Reinhard Breuer
Chefredakteur

Gesund aus der Retorte?

Die Hinweise verdichten sich: Retortenkinder leiden offenbar häufiger an Fehlbildungen als ihre natürlich gezeugten Mitmenschen. Augenscheinlich kommen Geburtsschäden, Entwicklungsstörungen und Erbdefekte bei ihnen vermehrt vor; auch Krebsleiden scheinen häufiger aufzutreten. Vor allem das seit zehn Jahren angewandte Fertilisationsverfahren, bei dem die Spermien per Kanüle in die Eizelle injiziert werden, steht unter Verdacht, Fehlbildungen zu verursachen. Auch die ältere, seit 25 Jahren übliche Reagenzglasbefruchtung wird zunehmend kritisiert – nicht wegen Missbildungen, sondern wegen gehäufter Mehrlingsschwangerschaften. Sie führen nämlich oft zu Frühgeburten, dem »entscheidenden Problem der Reproduktionsmedizin«, wie Klaus Diedrich von der Universitätsklinik in Lübeck im Spektrum-Interview kommentiert (Seite 42).

Wir haben den Medizinprofessor zu den nationalen und internationalen Befunden befragt, welche die Medizinjournalistin Martina Lenzen-Schulze für unsere Titelgeschichte zusammengetragen hat. Demnach gibt es keinen Anlass für Alarm, jedoch Grund genug für Besorgnis. Einmal mehr zeigt sich, dass Paare, die sich für eine künstliche Befruchtung entscheiden, gründlicher über die Risiken aufgeklärt werden müssen. Aber auch der Gesetzgeber ist nach Diedrichs Ansicht gefordert. In Ländern wie Belgien, Finnland oder Schweden darf von den befruchteten Eizellen vor der Übertragung auf die Mutter ein Embryo ausgewählt werden – mit dem Ergebnis, dass die Einnistungschance steigt und das Mehrlingsrisiko sinkt. Nach deutschem Recht ist das verboten. Man sollte, fordert Diedrich, »über eine Änderung des Embryonenschutzgesetzes nachdenken«.

»Die Praxis der künstlichen Befruchtung muss überdacht werden«

Unter Kosmologen herrscht seit einigen Jahren Umbruchstimmung. In unserer Zeitschrift haben wir deshalb in den letzten Monaten und Jahren immer wieder über neueste Entwicklungen auf diesem Gebiet berichtet. Die derzeitige Situation in der Kosmologie erinnert an die Zeit, als Albert Einstein 1905 mit seiner Speziellen Relativitätstheorie die Hypothese eines »Weltäthers« vom Tisch fegte. Ein neuer Befreiungsschlag dieser Güte ist nun wieder gefordert. Zum Abschluss unserer Artikelserie »25 Jahre Spektrum der Wissenschaft« berichtet der Münchener Forscher Gerhard Börner über die rasante Entwicklung der Kosmologie seit 1978. Was sich einst als irrige Hypothese herausstellte, kehrt nun in anderem Gewand wieder: Eine »Dunkle Energie« soll das Vakuum des Weltalls ausfüllen, fast wie einst der Weltäther (Seite 28).

Doch alle Versuche, diese Dunkle Energie physikalisch zu interpretieren, scheiterten bislang. Die Physiker errechnen für die Vakuumdichte nämlich einen Wert, der um 108 Größenordnungen über den kosmologischen Schätzungen liegt – eine fatale Diskrepanz zwischen Theorie und Beobachtung. Auch nach vier Jahrhunderten moderner Kosmologie verstehen wir das Weltall, in dem wir leben, offenbar noch immer nicht – interessante Zeiten für die Wissenschaft.

SPEKTROGRAMM

10 Ältester moderner Europäer · Metallfilme im Zwitterzustand · Die Schmerzen der Ausgeschlossenen

13 **Bild des Monats**
Schrumpfendes Eis der Arktis

FORSCHUNG AKTUELL

14 **Die Pforten der Zelle**
Chemie-Nobelpreis für Entdeckung und Charakterisierung von Membrankanälen

16 **Schonender Blick in den Körper**
Medizin-Nobelpreis für Entwicklung der Magnetresonanztomographie

20 **Superflüssige Materie**
Physik-Nobelpreis für Theorien zu Supraleitung und -fluidität

23 **Zeitreihen in der Ökonometrie**
Wirtschafts-Nobelpreis für Methoden zur Analyse von Börsenkursen

THEMEN

28 **25 Jahre Spektrum der Wissenschaft**
Teil XII: Kosmologie
Warum sich unser Bild vom Universum in den letzten Jahren radikal gewandelt hat

36 **Missbildungen bei Retortenkindern**
Die Befruchtung in der Petrischale birgt Gesundheitsrisiken
Dazu **Interview** mit K. Diedrich, Lübeck

48 **Klimakapriolen einer Treibhauswelt**
Im Saunaklima der Kreide kippten Ozeane um und lösten Temperaturstürze aus

58 **Evolution der Hominiden**
Die ersten Großen Menschenaffen entstanden in Eurasien

70 **Erkundung des Roten Planeten**
Drei Roboter suchen auf der Marsoberfläche nach Wasser und Lebensspuren

78 **Internationaler Schutz für Seepferdchen**
Die ungewöhnliche Lebensweise dieser kleinen Fische förderte ihre Ausbeutung

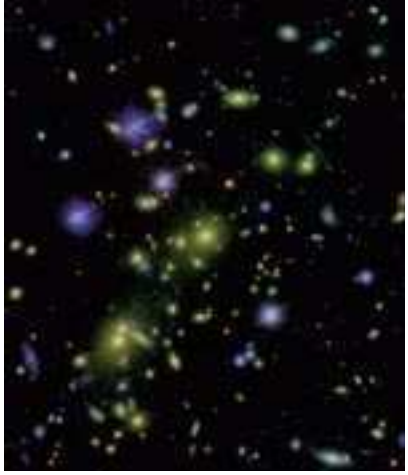
86 **Römischer Weinbau**
Im Experiment erweist sich die Findigkeit der antiken Winzer

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

92 **Ein blasser Geist**
Nachhaltigkeit als Strategie?
Dazu **Interview** mit A. Löhr, Zittau

Titelbild: Vor 25 Jahren kam das erste außerhalb des Mutterleibs gezeugte Kind zur Welt. Weltweit sind es inzwischen eine Million. Jetzt streiten Mediziner über die gesundheitlichen Folgen dieser Methoden.

Bild: Ryszard Horowitz, Corbis



SEITE 28

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (XII)

Ein Universum voll dunkler Rätsel

In einem Vierteljahrhundert ist die Kosmologie enorm vorangekommen – und musste entdecken, dass das All fast nur aus unsichtbarer Dunkler Materie und rätselhafter Dunkler Energie besteht.

SEITE 48

GEOWISSENSCHAFTEN

Klimakapriolen der Kreidezeit

Vor 94 Millionen Jahren glich die Erde einem Dampfbad. GroßeTeile der Meere verwandelten sich in stinkende Kloaken, an deren Boden sich totes Biomaterial anhäufte.

SEITE 58

ANTHROPOLOGIE

Das Zeitalter der Menschenaffen

In Eurasien – nicht in Afrika – stand die Wiege der Menschheit. Genauer: Dort entstanden die Großen Menschenaffen, aus denen später in Afrika der Mensch hervorging.

SEITE 70

PLANETEN

Erkundung des Roten Planeten

Zwei kleine Fahrzeuge und ein stationäres Labor werden in den kommenden Wochen auf unserem roten Nachbarplaneten landen und dort nach Wasser und eventuellen Resten primitiven Lebens suchen.

TITELTHEMA MEDIZIN

Krank aus der Retorte

SEITE 36

Entwicklungsstörungen und Fehlbildungen treten nach einer Befruchtung im Reagenzglas öfter auf als bei natürlich gezeugten Kindern. Mediziner fordern für neuere Verfahren eine kritischere Überwachung.

SEITE 78

ZOOLOGIE

Bedrohte Seepferdchen

Von diesen biologisch einzigartigen Fischen werden jährlich 25 Millionen gefangen – vor allem als vermeintliches Heilmittel.

SEITE 86

EXPERIMENTELLE ARCHÄOLOGIE

Der Wein der Römer

Das Imperium brachte den Weinbau nach Gallien. Französische Archäologen haben eine Kelter rekonstruiert und für Experimente genutzt. Das Ergebnis: Cicero dürften heutige Weine kaum geschmeckt haben.

96 Familie im Wandel
Noch kein Ausgleich der Ost-West-Unterschiede
Dazu **Interview** mit M. Kreyenfeld, Rostock

REZENSIONEN

100 Warum ist der Eisbär weiß? von B. Haring
Korallen und Wüsten von G. Guadalupi und G. Mesturini
Am Anfang war die Ökologie von A. P. und A. H. Hüttermann
Neues vom Zappelphilipp von G. Hüther und H. Bonney
Warum sie so seltsam sind von B. Strauch

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

110 Die stabilisierende Wirkung der Stichsäge

KOMMENTAR

25 Nachgehakt
Paralleluniversen – Wissenschaft oder Spekulation?

WISSENSCHAFT IM ...

46 Alltag: Die Kerze
68 Unternehmen: Wissenschaft als Kabarett
84 Rückblick: Ist Kaugummi gesund? u. a.
108 Internet: Kinder-Net

WEITERE RUBRIKEN

5 Editorial · 8 Leserbriefe/Impressum · 105 Preisrätsel · 112 Stellenmarkt · 122 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Im Reich der Terabytes

Mit den neuesten Festplatten ist das Zeitalter des Überflusses für Speicherplatz angebrochen – so mächtig, dass wir noch gar nichts damit anzufangen wissen.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Parallele Universen

August 2003

Wettstreit um Glaubensart

Ich frage mich, warum manche Naturwissenschaftler die leeren Räume ihres Nichtwissens mit immer neuen und abenteuerlichen Hypothesen ausfüllen und beleben müssen. Warum können sie nicht dort, wo die Reichweite ihres Wissens an Grenzen stößt, mit dem alten Sokrates bescheiden sagen »Oida uden eidoos – Ich weiß, dass ich nichts weiß«?

Gewiss ist den naturwissenschaftlichen Vertretern der genannten Hypothesen zugute zu halten, dass sie voll in der Mitte des geistigen Mainstreams unserer Zeit mitschwimmen. Die Menschen glauben heutzutage nun einmal nicht mehr an die Jungfrau Maria und den Erzengel Gabriel, sondern an Paralleluniversen, intelligentes Leben auf anderen Planeten und den legendären Befehl aus dem Raumschiff Enterprise »Scotty, beam us up!«.

Angesichts der Beweislage jedoch dürfte der Wettstreit, welche der beiden Glaubensarten spekulativer ist, ein totes Rennen sein.

Reiner Vogels, Essen

Mehr aus der neuen Sicht der Physik

Professor Tegmark hat mir eine ganz neue Sicht der physikalischen Welt nahe gebracht, und dies recht überzeugend. Ich wünsche mir, dass Sie noch mehr Artikel dieses Autors veröffentlichen, auch im Hinblick auf seine tiefgründigen wissenschaftstheoretischen Gedanken.

Prof. M. Beck, Mainz

siehe auch »Nachgehakt« in diesem Heft auf Seite 25

Galaxien im Ausnahmezustand

September 2003

Dieser Beitrag bestärkt das neue Paradigma der Galaxienentstehung und -entwicklung, das nicht mehr von einer kontinuierlichen gravitativen Gas- und Staubzusammenballung ausgeht, sondern die expansive Rolle prästellarer, superdichter kosmischer Objekte voraussetzt. Ich möchte daran erinnern, das dieser Paradigmenwechsel zwar erst in den letzten Jahren auch durch die neuen Beobachtungsmöglichkeiten verifiziert wird – aber sein Ursprung besteht im Lebenswerk des armenisch-sowjetischen Astrophysikers Viktor A. Ambarzumjan, der leider in den 1990er Jahren verstarb. Die erste Erwähnung der Hypothese, Galaxien seien die Folge expansiver Prozesse aus superdichten Objekten heraus, wird für 1933 vermutet. Damals wurde sein Konzept im Wesentlichen abgelehnt, weil derartige »prästellare (bzw. prägalaktische) superdichte Körper« mit der vorhandenen Physik nicht beschreibbar waren. Über den »Umweg«, diese Objekte als »Schwarze Löcher« zu etikettieren, erleben wir nun seit einigen Jahren den oben genannten Paradigmenwechsel, ohne dass der wissenschaftshistorischen Gerechtigkeit Genüge getan wird, Ambarzumjan als seinen Vater zu benennen.

Annette Schlemm, Jena

NASA / CXC / GERALD CECIL, UNIVERSITY OF NORTH CAROLINA

▲ Eine riesige Blase aus heißem Gas (hier in der Bildmitte) wird mit rund tausend Kilometer pro Sekunde aus dem Galaxienkern herausgeschleudert.

Gesteine

Rezensionen, Oktober 2003

Der Rezensent Gunther Jauk hat Aussagen des Buches »Gesteine« von Peter Rothe falsch wiedergegeben:

Abraham Werner war kein Plutonist, sondern der Begründer des Neptunismus.

Granite sind nicht sedimentärer Entstehung, sondern entweder magmatisch oder durch Aufschmelzung älterer Gesteine bei der Metamorphose entstanden.

Dr. Helmut W. Flügel, Graz, Österreich

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0 21 1) 90 83 57, Fax (0 21 1) 90 83 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Sabrina Serbource, Roberta Veglio.

Leser- und Bestellservice: Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61-50, Fax (0 62 01) 60 61-94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0 21 1) 887-23 79, Fax (0 21 1) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 887-23 76, Fax (0 21 1) 37 49 55
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (0 30) 61 68 61 50, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 183/-183/-194, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 3 01 35-20 60, Fax (0 21 1) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 24 24-45 36, Fax (0 69) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (0 71 1) 22 47 5-40, Fax (0 71 1) 22 47 5-49; München: Bernd Schwetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-14, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 887-23 87, Fax (0 21 1) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2003 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

Zuerst kam die Feder

Oktober 2003

Das Federkleid muss für die Dinosaurier wenigstens einen evolutiven Vorteil gegenüber den Schuppen und schweren Panzerungen gehabt haben.
1. Die Dinosaurier brauchten sich nicht mehr zu häuten, hatten aber trotzdem eine verlässliche Körperbedeckung. Unter der Voraussetzung, dass sie sich im Vergleich zu den (Schuppen-)Reptilien nicht zu häuten brauchten, wird verständlicher, warum sich andere Körperbedeckungen wie Federkleid und Fell entwickelten. Sie waren dann einfach besser an klimatische Bedingungen angepasst.
2. So wird auch verständlicher, warum die Federn, wie im Artikel ausgeführt, keine evolutive Erweiterung der Schuppen sind, sondern vollkommen eigenständige Gebilde der Haut.
3. Das Federkleid diente zunächst einmal nur dem Schutz vor Kälte. Deswegen entwickelten sich auch erst die Daunenfedern. Doch als sich die Konturfeder entwickelte, war damit die Möglichkeit zum Fliegen geschaffen.

Steffen Floßen, Jena

Flinke Flüssigkeiten

Wissenschaft im Unternehmen, August 2003

Die Funktion des Stoßdämpfers wird hier so dargestellt, als drücke dieser den Reifen auf die Fahrbahn. Das ist nicht korrekt, der Reifen drückt mit der ihm zugeordneten Radlast auf den Asphalt. Die Federung ist so ausgelegt, dass sie anteilig über die Räder das Fahrzeuggesamtgewicht trägt. Der Dämpfer hat das Nachschwingen der Federung zu unterbinden.

Die genannten erwünschten Stoßdämpfereigenschaften gibt es bei hochwertigen Modellen, wie sie im Motorsport eingesetzt werden. Hier können Zug- und Druckstufe separat und individuell eingestellt werden. Straßenfahrzeuge müssen mit Kompromissen leben: Federung und Dämpfung haben für alle vorkommenden Straßenoberflächen und Beladungen einigermaßen zu funktionieren, Verschleiße inbegriffen.

Jens-U. Knoll, Taunusstein

Matrix reloaded – Leben wir in einer Simulation?

Forschung und Gesellschaft, Oktober 2003

Christoph Pöppe stellt in seinem Beitrag mehrfach heraus, dass die »Götter« für die Simulation keinen übermässigen Aufwand treiben wollen. Ich (leider kein Gott, sondern nur Agrarwissenschaftler) würde beim Simulieren zuerst sieben der zehn Raum-Dimensionen der echten Welt eliminieren (Fachausdruck bei den göttlichen Programmierern: »einrollen«). Drei Dimensionen sollten für eine Simulation locker reichen, Lara Croft wird ja auch nur zweidimensional abgebildet.

Dr. Boy Feil, Zürich

Aktive Atmung bei Insekten

Forschung aktuell, Oktober 2003

Der Artikel über unsere Arbeit zur aktiven Tracheenatmung bei Insekten ist spannend und lebendig geschrieben. Leider haben sich zwei Fehler eingeschlichen. Wir haben nicht zwölf Zweiflügler-Arten, sondern zwölf Insekten-Arten untersucht. Die Zweiflügler sind ja nur eine Ordnung innerhalb der Insekten, nämlich die Fliegen. Außerdem wird die »intermittierende Atmung« in einem falschen Zusammenhang erwähnt. Es handelt sich dabei nicht um einen Mechanismus der aktiven Ventilation, sondern um ein Phänomen der konvektiven Atmung, das vor allem beim ruhenden Insekt beobachtet wurde und vermutlich dem Einsparen von Wasser dient.

PD Dr. Oliver Betz, Kiel

Der Charme des Champagners

Leserbriefe, Oktober 2003

Als Physiklehrer, dessen Sohn bei der Abiturprüfung eine ähnliche Aufgabe versiebte, musste ich beim Lesen dieses Briefes schmunzeln, da nicht berücksichtigt wurde, dass der atmosphärische Luftdruck auf der Wasser- – pardon! – Champagner-Oberfläche lastet. Und das ist schon mal 1 Bar. 10 Zentimeter weiter unten am Boden des Kelches sind es 10 Millibar mehr. Das bedeutet, der Druck nimmt beim Aufsteigen der Blase von 1.01 Bar auf 1.00 Bar, also gerade um rund 1 Prozent ab. Und das wirkt sich aufs Volumen aus. Wenn wir stattdessen aber den Durchmesser betrachten, ist es nur noch die dritte Wurzel von 1 Prozent, und das sind rund 3 Promille. Dieser Effekt würde sich also nur bei starkem Unterdruck auswirken, und dort ist er tatsächlich umwerfend. Das zeige ich aber nie mit Sekt, nur mit Wasser!

Klaus Kohl, Hasliberg Goldern, Schweiz

Errata

Mit Zufall und Statistik zum Ziel

Oktober 2003

Hier hat sich der Fehlerteufel eingeschlichen. Pierre Curie entdeckte 1894 die Temperaturunabhängigkeit des Diamagnetismus, nicht die Temperaturabhängigkeit, wie dort geschrieben steht.

Flinke Flüssigkeiten

Wissenschaft im Unternehmen, August 2003

Bei der Benennung ist uns ein Fehler unterlaufen: Das »i« im Namen war falsch, das Unternehmen heißt: Fludicon GmbH, Landwehrstraße 50, 64293 Darmstadt, Tel.: 06151/27986, E-Mail: info@fludicon.com

Sonderteil »Innovation in Deutschland«

November 2003

Wir haben hier fälschlicherweise die Anzahl der weltweiten Auto-Neuzulassungen pro Jahr von 50 Millionen allein Deutschland zugeschrieben.

Die Redaktion

KAZUHIKO SANO

▼ Auf dem Ast sitzt ein *Microraptor.* Von dieser Gattung fanden Paläontologen neuerdings Fossilien mit befiederten Hinterbeinen.

SPEKTROGRAMM

ASTRONOMIE

Magischer Nachweis von Gammastrahlung

Seit 2001 unter Federführung des Münchner Max-Planck-Instituts für Physik gebaut, hat das weltweit größte Gammastrahlen-Teleskop mit dem klangvollen Namen Magic *(Major Atmospheric Gamma-Ray Imaging Cherenkov Detector)* nun seine Arbeit aufgenommen. Die Einweihung fand am 10. Oktober statt. Auf dem Roque de los Muchachos, dem höchsten Berg der kanarischen Insel La Palma, wird Magic mit bislang unerreichter Empfindlichkeit die energiereiche Strahlung von fernen Galaxien, Quasaren und Supernovae-Resten auffangen. Bis zu 8 Milliarden Lichtjahre tief kann es dabei ins All schauen. Forscher erhoffen sich von ihm Antworten auf brennende astronomische Fragen: Welcher Mechanismus beschleunigt die Teilchen der kosmischen Strahlung auf ihre enorme Energie, wie bildeten sich die ältesten Objekte im Kosmos, und lassen sich im Weltall Effekte der Quantengravitation aufspüren? Allerdings ist die Erdatmosphäre für Gammastrahlung undurchlässig; nur Raketen oder Satelliten können sie direkt messen. Darum arbeitet Magic mit einem »Trick«: In den oberen Atmosphärenschichten treten die kosmischen Gammaquanten in Wechselwirkung mit Atomkernen, wobei Sekundärteilchen entstehen und so genannte Tscherenkow-Strahlung freigesetzt wird. Indem das Teleskop diese Lichtblitze registriert, kann es Gammastrahlung im Energiebereich von 20 bis 300 Milliarden Elektronenvolt aufspüren. Damit schließt Magic eine Lücke zwischen den Messbereichen von Satelliten und bisherigen Tscherenkow-Teleskopen.

(Max-Planck-Gesellschaft, 10.10.2003)

ZOOLOGIE

Frosch zeigt lange Nase

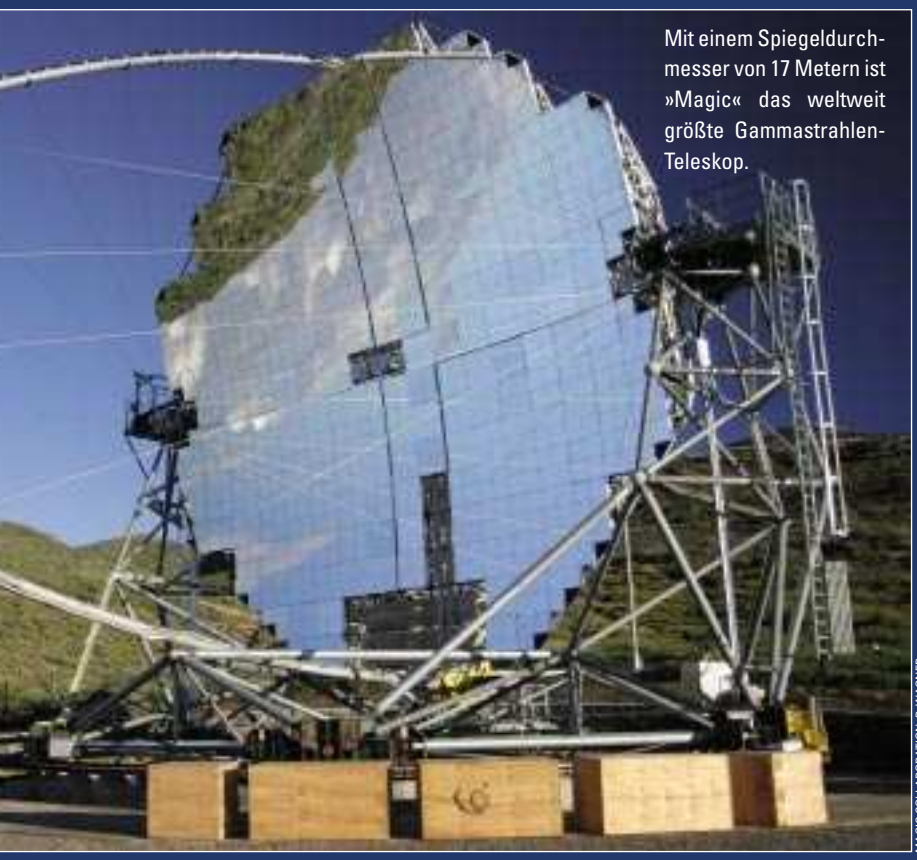
Er hüpfte schon durch die Berge Südindiens, als die Dinosaurier noch die Erde beherrschten. Doch erst jetzt geriet er ins Blickfeld der Wissenschaft: der Nasenfrosch *(Nasikabatrachus sahyadrensis)*, benannt nach seiner kuriosen, vorstehenden Schnauze. Und kaum entdeckt, machte er gleich Karriere als lebendes Fossil.

Analysen seiner Erbsubstanz ergaben, dass er das einzige verbliebene Mitglied einer bisher unbekannten Froschfamilie ist, die sich schon vor ungefähr 130 Millionen Jahren von der Abstammungslinie trennte, zu der 96 Prozent der heute lebenden Froscharten gehören. Auch seine nächste Verwandtschaft, die Familie der Sooglossidae, ist nur auf zwei Seychellen-Inseln durch vier Arten vertreten. Nach Ansicht des indischen Herpetologen S. D. Biju und seines Kollegen Franky Bossuyt von der Freien Universität Brüssel, die den Nasenfrosch entdeckten, dürfte dessen Sonderstellung und die seiner Verwandten mit der Geschichte des indischen Subkontinents zusammenhängen. Dieser löste sich vor 130 Millionen Jahren vom Osten der Antarktis und driftete nach Norden, wobei sich Madagaskar und die Seychellen ablösten. Rund hundert Millionen Jahre lang bot die wandernde Landmasse somit ein isoliertes Labor für Sonderwege der Evolution.

(Nature, 16.10.2003, S. 711)

S. D. BIJU, F. BOSSUYT, NATURE, BD. 425, S. 711

Der Nasenfrosch *Nasikabatrachus sahyadrensis* gräbt sich mit Schnauze und Krallen gerne ins lockere Erdreich ein. Vielleicht wurde er deshalb erst jetzt entdeckt.



Mit einem Spiegeldurchmesser von 17 Metern ist »Magic« das weltweit größte Gammastrahlen-Teleskop.

MAGIC COLLABORATION, R. WAGNER

PALÄANTHROPOLOGIE

Ältester moderner Europäer

PNAS

▲ Dieser 35 000 Jahre alte Unterkiefer aus Rumänien vereint Merkmale des modernen Menschen und des Neandertalers.

Ein Unterkiefer, der Anfang 2002 in der Höhle »Petra cu Oase« im Südwesten Rumäniens gefunden wurde, hat sich als bisher ältester Knochenrest des modernen Menschen in Europa entpuppt. Ein Team um Erik Trinkaus von der Washington-Universität in St. Louis datierte das Fossil mit der Radiokarbonmethode auf etwa 35 000 Jahre.

Die meisten Merkmale des Kiefers entsprechen denen vergleichbarer Funde des anatomisch modernen Menschen aus Afrika, dem Mittleren Osten und dem späteren Europa. Es gibt aber auch eher archaische Merkmale. So sind die Backenzähne – soweit erhalten – außergewöhnlich groß; das gilt besonders für den Weisheitszahn. Die eigentliche Sensation ist freilich, dass der Rand des Mandibularkanals, der Austrittsstelle des Haupt-Zahnnervs, nicht eingekerbt ist wie beim modernen Menschen, sondern verwachsen wie beim Neandertaler. Trinkaus und seine Kollegen werten dies als Beleg dafür, dass sich der moderne Mensch bei der Einwanderung nach Europa mit dem alteingesessenen Neandertaler genetisch vermischte. Über diese Frage wogt unter den Paläanthropologen seit langem ein erbitterter Streit. *(Proceedings of the National Academy of Sciences, 30.9.2003, S. 11231)*

ARCHÄOLOGIE

Großes Theater für kleine Garnison

Es war nur eine kleine Grenzbefestigung in der römischen Provinz Rätien, doch für die Unterhaltung der Soldaten war bestens gesorgt. Das zeigt der Grundriss eines hölzernen Amphitheaters, der in Künzing an der Donau zu Tage kam, als ein Gebiet am Stadtrand vor dem geplanten Bau einer Wohnsiedlung archäologisch untersucht wurde. Es ist die erste in Deutschland entdeckte Konstruktion dieser Art. Um die 35 mal 31 Meter große Arena waren Holzbänke errichtet, deren Stützpfosten sich als dunkle Verfärbungen im hellen Lösslehm abzeichnen. Aus dem Abstand der Stützen lässt sich errechnen, dass etwa 800 Zuschauer auf vier Rängen Platz fanden. Die Besatzung des Auxiliarkastells umfasste allerdings nur 500 Mann. Demnach stand die Arena wohl auch den Bewohnern des nahen Dorfes offen. Bis etwa 120 n. Chr. war in dem Künzinger Kastell die 3. Thrakerkohorte stationiert, die aus dem heutigen bulgarischen oder nordgriechischen Gebiet stammte. Ab der Mitte des zweiten Jahrhunderts nach Christus belegte dann die 5. Kohorte *Bracaraugustanorum* aus dem Nordwesten der Iberischen Halbinsel die Befestigung. Wenn schon ein so kleiner Stützpunkt wie Künzing mit einem Amphitheater ausgestattet war, ist davon auszugehen, dass derartige Bauten auch bei anderen Grenzanlagen existierten und bisher nur übersehen wurden. *(Pressekonferenz am 23.10. 2003)*

▼ Anhand der Bodenverfärbungen lässt sich der Grundriss des Amphitheaters samt der Stützpfeilerkonstruktion für die Bankreihen aus der Luft gut erkennen.

KLAUS LEIDORF, BUCH AM ERLBACH

PHYSIK

Metallfilme im Zwitterzustand

Bei extrem tiefen Temperaturen werden manche Metalle supraleitend. Dann fungieren nicht mehr einzelne Elektronen, sondern Elektronenpaare als Ladungsträger. Damit der elektrische Widerstand verschwindet, müssen sich diese so genannten Cooper-Paare zusätzlich alle im selben Quantenzustand befinden oder – wie Physiker sagen – phasenkohärent sein. Wird ihr »Gleichtakt« zerstört, bricht nicht nur die Supraleitung zusammen, sondern es entsteht sogar ein perfekter Isolator; andere Möglichkeiten gibt es der Theorie nach nicht. Doch die Praxis sieht anders aus: Experimente aus den letzten Jahren haben gezeigt, dass dünne supraleitende Metallfilme manchmal einen elektrischen Widerstand aufweisen, der weder null noch unendlich ist, sondern normaler metallischer Leitfähigkeit entspricht. Die Theorie der Metalle sei in einer Krise, erklären deshalb die US-Physiker Philip Phillips und Denis Dalidovich. Doch haben sie die Rettung schon parat. Ihren theoretischen Untersuchungen zufolge können die Cooper-Paare in einem ungeordneten, »glasartigen« Zustand kondensieren. Darin gibt es lokale Reste von Ordnung, die für die metallische Leitfähigkeit sorgen. *(Science, 10.10.2003, S. 243)*

Im Zustandsdiagramm dünner Metallfilme kann zwischen der Isolator-Region (außen) und dem supraleitenden Zustand (gelb) ein »glasartiger« Übergangsbereich mit lokal geordneten Elektronenpaaren (blau) auftreten.

UNIVERSITÄT VON ILLINOIS, URBANA-CHAMPAIGN

NEUROPHYSIOLOGIE

Die Schmerzen der Ausgeschlossenen

Seelische Verletzungen tun weh, wie jeder aus Erfahrung weiß. Dass dabei sogar dasselbe Hirnareal aktiv ist wie bei körperlichem Schmerz, konnten Forscher erst jetzt experimentell nachweisen. Während eines virtuellen Ballspiels am Computer überwachten Naomi Eisenberger und ihre Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in Los Angeles die Hirnaktivität der Versuchspersonen durch funktionelle Magnetresonanztomographie. Dabei schlossen sie gelegentlich einzelne Teilnehmer aus unersichtlichen Gründen vom Spiel aus. Bei den derart Frustrierten regte sich daraufhin der vordere cinguläre Cortex (ACC) – jenes Areal, das auch auf körperlichen Schmerz anspricht. Ein unabsichtlicher Ausschluss vom Spiel – etwa durch technische Probleme – wirkte sich hingegen nicht auf die betreffende Hirnregion aus. Ob Zurückweisung oder Verlust einer Bezugsperson: Dass Menschen seelische Schmerzen empfinden, zeigt nach Ansicht der Forscher, wie wichtig soziale Beziehungen für Säugetiere sind. Auch das Schreien von Kindern schlägt sich bei Müttern in einer erhöhten Aktivität des ACC nieder.
(Science, 10.10.2003, S. 290)

N. EISENBERGER ET AL., SCIENCE, BD. 302, S. 291

▲ Bei einer vom Spiel ausgeschlossenen Versuchsperson ist die Aktivität im vorderen cingulären Cortex erhöht (rot).

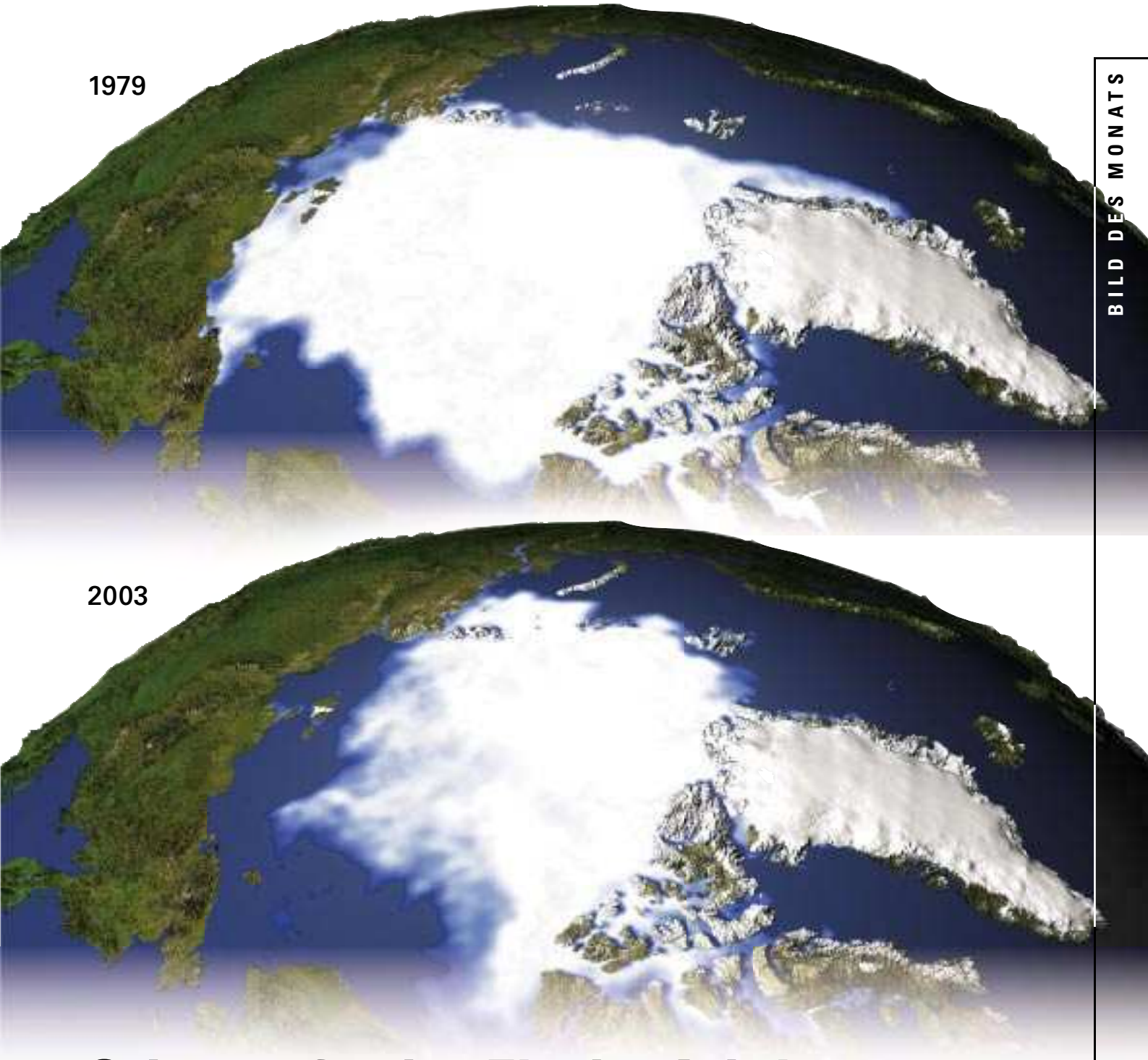
GENPFLANZEN

Das Kreuz mit der ungewollten Kreuzung

Eine der großen Befürchtungen beim Anbau genetisch veränderter Kulturpflanzen im Freiland ist, dass diese sich mit ihren wilden Verwandten kreuzen und ihnen dabei unerwünschte Eigenschaften wie Resistenzen gegen Herbizide oder Antibiotika verleihen. Mike J. Wilkinson von der Universität Reading (England) hat zusammen mit Kollegen dieses Risiko am Beispiel von Raps abgeschätzt. Die Forscher ermittelten zunächst mit verschiedenen Methoden in Großbritannien die gesamte Anbaufläche der Kulturform *Brassica napus* sowie die Verbreitung der Wildart *Brassica rapa*, die besonders gern an Flussufern, aber auch als »Unkraut« in Rapsfeldern auftritt. Dann bestimmten sie in repräsentativen Testarealen die Anzahl von zufälligen Kreuzungen und rechneten sie auf Großbritannien insgesamt hoch. Demnach entstehen dort jährlich 49000 Hybride. Allerdings ist deren Verteilung sehr ungleich. So finden sich in den Midlands, wo Kulturraps und Wildform besonders dicht zusammenstehen, die meisten Kreuzungen. Die Forscher ziehen aus ihren Untersuchungen zwei grundlegende Schlüsse. Zum einen muss die Kreuzungsrate zwischen genverändertem Kultur- und Wildraps durch geeignete Maßnahmen mindestens hunderttausendfach gesenkt werden, um Hybride wirkungsvoll zu verhindern. Zum anderen lässt sich bei gentechnisch modifizierten Pflanzen das Kreuzungsrisiko mit Wildformen nicht anhand lokaler Stichproben, sondern nur durch landesweite Untersuchungen sinnvoll abschätzen.
(Science, 17.10.2003, S. 457)

▼ Wilder Raps gedeiht vor allem an Flussufern. Gibt es in der Nähe Felder mit Kulturraps, ist das Risiko einer genetischen Vermischung besonders groß.

MIKE J. WILKINSON



Schrumpfendes Eis der Arktis

Der Vergleich zweier Satellitenbilder von 1979 (oben) und 2003 (unten) macht unmittelbar augenfällig, wie stark die Meereisdecke am Nordpol in den letzten 25 Jahren geschrumpft ist. Die Aufnahmen wurden aus Daten des *Spezial Sensor Microwave Imager* (SSMI) an Bord der Satelliten F8, F11 und F13 des *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) der USA erzeugt. Gezeigt ist jeweils die minimale Ausdehnung des Eises in dem betreffenden Jahr. Anhand dieser und ähnlicher Daten hat Mark C. Serreze von der Universität von Colorado ermittelt, dass sich die arktische Meereisdecke in den letzten dreißig Jahren um neun Prozent pro Jahrzehnt verkleinert hat. Das passt zum Ergebnis einer neuen Klimastudie von Josefino C. Comiso vom Goddard-Raumfahrtzentrum der Nasa in Greenbelt (Maryland), der anhand von Satelliten-Infrarot-Daten die Temperatur der Meeresoberfläche bestimmte. Demnach hat sich die Arktis in den letzten zwanzig Jahren achtmal so stark erwärmt wie im Durchschnitt des letzten Jahrhunderts. Das Schmelzen des Meereises lässt zwar den Meeresspiegel nicht steigen, verstärkt aber den allgemeinen Erwärmungstrend, weil die Eisdecke das Sonnenlicht stärker reflektiert als der offene Ozean.

VISUALIZATIONS STUDIO, NASA / GSFC

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Die Pforten der Zelle

Nieren und Nerven gehören zu den größten Nutznießern jener Kanäle in der Zellmembran, für deren Entdeckung und Strukturaufklärung der diesjährige Chemie-Nobelpreis verliehen wurde.

Von Michael Groß

Die Außenmembran ist einer der wichtigsten Bestandteile aller lebenden Zellen. Die ersten präbiotischen Reaktionszyklen mögen noch ohne sie ausgekommen sein. Aber Leben in seiner heutigen Form konnte sich nur entwickeln, weil irgendwann ein wasserdichtes Behältnis die Möglichkeit schuf, grundlegende Stoffwechselprozesse getrennt von der unbelebten Umgebung ablaufen zu lassen.

Obwohl die Zelle eine Hülle braucht, um sich selbst zu definieren und vom Rest der Welt abzugrenzen, darf sie sich nicht hermetisch abriegeln. Sie ist darauf angewiesen, Stoffe mit der Außenwelt auszutauschen – nur muss das in kontrollierter Weise geschehen. In gewissem Sinne gleicht die Zelle somit einer mittelalterlichen Stadt, die sich mit einer Mauer gegen potenzielle Feinde von außen abschottete, aber in allen vier Himmelsrichtungen jeweils ein Stadttor einbaute, an dem Wächter entschieden, wer hinein oder hinaus durfte.

Bei der Zellmembran spielt die Geografie natürlich keine Rolle. Hier unterscheiden sich die Tore in der Art der Güter, die hindurchgelassen werden. Außerdem können die molekularen Torwächter der Zelle nicht beliebig komplizierte Entscheidungen treffen. Deshalb gibt die Form der Öffnung bereits vor, was überhaupt passieren darf. Die Entscheidung reduziert sich dann meist auf eine Ja-nein-Antwort, die von diversen chemischen oder elektrischen Signalen gesteuert werden kann.

Der diesjährige Nobelpreis für Chemie würdigt bahnbrechende Arbeiten über zwei verschiedene Arten von Zelltoren. Peter Agre von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) erhielt die Auszeichnung für die Entdeckung der Schleusen, die den kontrollierten Zu- oder Abfluss von Wasser ermöglichen. Roderick MacKinnon von der Rockefeller-Universität in New York wurde dafür geehrt, dass er vor gut fünf Jahren erstmals die molekulare Struktur eines Ionenkanals ermittelte.

Wählerische Wasserschleusen

Noch bis Anfang der 1990er Jahre geisterten die Wasserschleusen der Zellmembran lediglich als hypothetische Gebilde durch die Wissenschaft. Aus physiologischen Untersuchungen wusste man, dass bestimmte Arten von Zellen sowohl in Pflanzen als auch in Tieren das kostbare Nass sehr viel schneller aufnehmen und abgeben können, als mit einer rein zufälligen, noch dazu energetisch ungünstigen Diffusion durch die Wasser abweisende Fettschicht der Zellmembran erklärbar ist. Zudem war bekannt, dass sich der kontrollierte Wasserdurchlass durch organische Quecksilberverbindungen hemmen lässt, während der Diffusionsprozess davon unbeeinflusst bleibt.

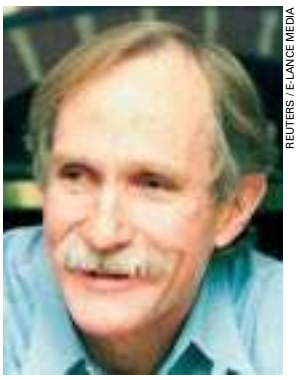
Seit Mitte der 1980er Jahre hatte Agre mit seiner Arbeitsgruppe Membranproteine von roten Blutkörperchen untersucht. Eines davon erregte sein besonderes Interesse, weil er es auch in der Niere fand. In beiden Zelltypen ist die Außenmembran für Wasser ungewöhnlich durchlässig. Neugierig geworden, identifizierte und entzifferte Agre das Gen für das auffällige Membranprotein. Damit kannte er auch dessen chemische Zusammensetzung, das heißt die Abfolge der Aminosäuren, aus denen es aufgebaut ist. Das Ergebnis legte nahe, dass das Protein die Membran mehrfach überspannt. Das bestärkte Agre in der Vermutung, dass es sich um die lange gesuchte Wasserpforte handeln könnte.

Den Beweis lieferte er mit einem gentechnischen Experiment. Er injizierte Boten-RNA des Proteins in Eizellen des Krallenfrosches, sodass diese die mutmaßliche Schleuse herstellten und in ihre Membran einbauten. Dann legte er die normalen und die manipulierten Zellen einfach in Wasser. Während mit Ersteren nichts geschah, begannen die Letzteren wie Frankfurter Würstchen im Kochtopf anzuschwellen. Denn wegen der gelösten Salze in ihrem Inneren strömte Wasser durch die Membranproteine ein – ein als Osmose bekanntes Phänomen. Bei den normalen Zellen blieb das Wasser dagegen mangels geeigneter Poren ausgeschlossen. Ein analoges Ergebnis erhielt Agre mit künstlichen Membranbläschen (Liposomen). Auch die hemmende Wirkung der Quecksilberverbindungen konnte er in diesem einfachen Experiment nachvollziehen.

In der Folgezeit fanden sich viele weitere Wasserkanäle oder Aquaporine, wie Agre sie nannte, in den verschiedensten Zellen, von Bakterien bis hin zu diversen menschlichen Organen (Spektrum der Wissenschaft 2/1996, S. 24). Allerdings blieb zunächst unklar, wie diese Membranproteine sicherstellen, dass nur Wassermoleküle hindurchschlüpfen und nicht etwa auch die wesentlich kleineren Natrium-Ionen. Die Antwort lieferte erst vor drei Jahren die Röntgenstrukturanalyse eines Aquaporins durch das Team von Yoshinori Fujiyoshi in Kioto unter Mitwirkung von Agre *(Nature, Bd. 407, S. 599)*. Dabei zeigte sich, dass in der Mitte des engen Kanals eine Ansammlung positiver Gruppen allen gleichartig geladenen Teilchen wie Natrium-Ionen oder den an Wassermoleküle gebundenen Protonen den Durchgang verwehrt.

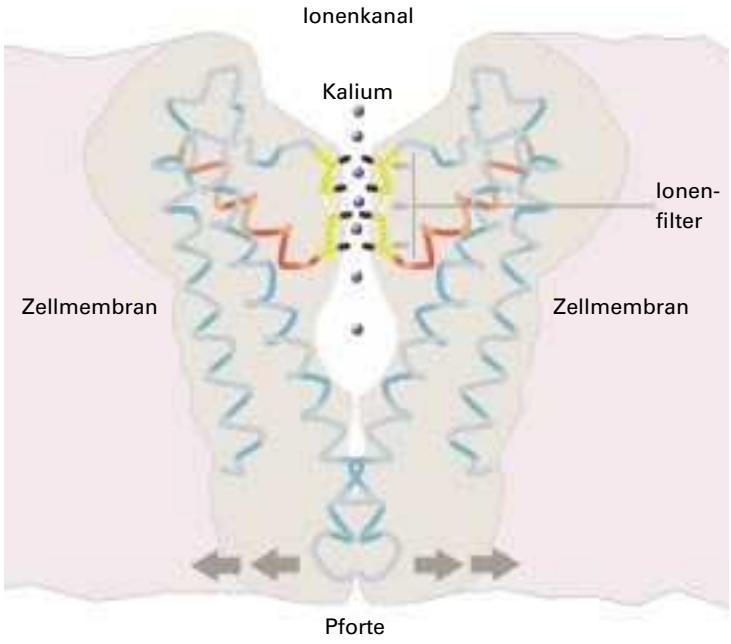
Schon zwei Jahre davor hatte allerdings der zweite Laureat die dreidimensionale Gestalt des ersten Ionenkanals überhaupt ermittelt. Die detaillierte Beschreibung der Schleuse, welche Kalium-

DPA



REUTERS / E-LANCE MEDIA

Roderick MacKinnon (links) von der Rockefeller-Universität in New York und Peter Agre von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) teilen sich den Chemie-Nobelpreis für ihre Untersuchungen über Membrankanäle.



Der Kaliumkanal, dessen Struktur Roderick MacKinnon aufklärte, enthält auf der Außenseite einen Filter, der nur Kalium-Ionen passieren lässt. Ein Tor auf der Innenseite öffnet oder schließt sich je nach der Spannung, die an der Membran anliegt.

Die von Agre entdeckten Aquaporine fungieren als zelluläre Wasserschleusen. Wie die Röntgenstrukturanalyse eines Vertreters namens AQP1 ergab, lassen positiv geladene Seitenketten von Aminosäuren in der Mitte des Kanals nur neutrale Teilchen hindurch.

Ionen durch die Zellmembran hindurchlässt (aber nicht etwa die kleineren Natrium-Ionen!), war die strukturbiologische Sensation des Jahres 1998.

Roderick MacKinnons Weg zu diesem Durchbruch war keineswegs geradlinig. Er studierte zunächst Biochemie, schwenkte dann um auf Medizin und arbeitete einige Zeit als Arzt, bevor er sich mit 30 Jahren für die Forscherlaufbahn entschied, um die Funktion von Ionenkanälen besser verstehen zu lernen. Insbesondere wollte er wissen, wie das Gift des Skorpions den Kaliumkanal blockiert. Er erkannte, dass er dafür letztendlich dessen exakte räumliche Gestalt herausbekommen müsste, und begann sich als kristallografischer Laie in die Strukturaufklärung einzuarbeiten.

Zugangskontrolle zur Zelle

Seine damaligen Chefs an der renommierten Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) zeigten sich wenig erbaut von dem waghalsigen Plan, der vielleicht erst in zehn Jahren zum Erfolg führen würde. Deshalb wechselte MacKinnon 1996 an die Rockefeller-Universität in New York, wo er Unterstützung für sein Vorhaben fand. Tatsächlich stellte sich der Erfolg schon nach zwei Jahren ein, wobei als Untersuchungsobjekt der relativ einfach aufgebaute Kanal eines Bakteriums diente, der sich leichter kristallisieren ließ als Membranproteine höherer Organismen.

Die Struktur, die MacKinnons Arbeitsgruppe 1998 präsentierte, erinnert an einen Trichter, der sich zur Innenseite der Zellmembran hin verengt und an seinem weiten äußeren Ende den Wächter beherbergt. Dieser besteht aus vier Armen, die in das Loch in der Mitte des Proteins hineinragen. Die Sauerstoffatome an ihren Enden bilden eine Höhle mit genau denselben Abmessungen wie der Käfig aus Wassermolekülen, der das Kalium-Ion in wässriger Lösung umgibt. Beim Übertritt in den Kanal bleibt die chemische Umgebung für das Teilchen also praktisch gleich. Dagegen ist für das Natrium-Ion die Höhle zu weit: Es kann sich nicht mit allen vier Sauerstoffatomen gleichzeitig umgeben, weil dann die Abstände zu groß werden und eine energetisch ungünstige Situation entsteht. So erklärt sich die auf den ersten Blick paradoxe Situation, dass eine Öffnung für ein relativ dickes Teilchen durchlässig ist, für ein kleineres, das eigentlich besser hindurchpassen sollte, jedoch nicht.

Aber auch Kalium-Ionen dürfen nicht immer passieren. So wie die Tore einer mittelalterlichen Stadt am Abend geschlossen wurden, kann auch der Kaliumkanal die Schotten dicht machen. Tatsächlich gibt es eine Reihe von Modellen, die sich in der Form des Tors ähneln, während der Schließmechanismus in unterschiedlicher Weise auf elektrische oder chemische Signale reagiert. Für die erste Strukturaufklärung hatte MacKinnon diesen Aspekt einfach beiseite gelassen: Er kristallisierte ein Proteinfragment, das nur die Pore, nicht aber den regulatorischen Teil des Kanals enthielt. Inzwischen hat er das Versäumte nachgeholt und die komplette Struktur eines spannungsregulierten Kaliumkanals ermittelt, aus der sich auch der Schließmechanismus ableiten ließ (Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 14).

Beide Laureaten hätten statt des Nobelpreises für Chemie ebenso gut den für Physiologie oder Medizin erhalten können; denn ihre Arbeiten erhellen die Grundlagen physiologischer Vorgänge und haben enorme Bedeutung für die Medizin. Der menschliche Körper benutzt mindestens elf verschiedene Wasserkanäle. Ihr Haupteinsatzfeld sind die Nieren, wo täglich rund 170 Liter Primärharn produziert und dann über Aquaporine größtenteils wieder vom Blutkreislauf resorbiert werden. Zur Steuerung der Wasserschleusen dienen hier Hormone wie Vasopressin. Auch ▷

▷ viele Krankheiten hängen mit einer Fehlfunktion der Aquaporine zusammen, sodass Kenntnisse über diese Membranproteine Fortschritte bei der Therapie versprechen – etwa zur Vermeidung von Folgeschäden nach Schlaganfällen.

Die diversen Ionenkanäle haben vor allem für neurologische Vorgänge enorme Bedeutung. Deshalb sind sie nicht nur für Skorpione ein attraktiver Ansatzpunkt, um das Opfer zu lähmen, sondern auch für Pharmakologen, die Medikamente gegen Störungen der Nervenfunktion entwickeln. Die Kenntnis ihrer genauen Struktur macht es möglich, Wirkstoffe maßzuschneidern, die zielsicher ausschließlich einen bestimmten Kanal beeinflussen. Mit ihrer Hilfe können wir dann nicht nur besser verstehen, wie der Verkehr durch die Zellmembran abgewickelt wird, sondern auch selbst entscheiden, wer in unseren Zellen ein- und ausgehen darf.

Michael Groß hat in Biochemie promoviert und ist freier Wissenschaftsjournalist sowie »Science Writer in Residence« am Birkbeck College in London.

NOBELPREIS FÜR MEDIZIN

Schonender Blick in den Körper

Berührungslos und ohne Strahlenbelastung ein Bild vom Inneren des Patienten zu gewinnen: Dieser alte Traum der Mediziner ging mit der Magnetresonanztomographie in Erfüllung. Zwei ihrer Pioniere erhielten nun mit großer Verspätung den Medizin-Nobelpreis.

Von Ulrich Katscher

Immer mehr Menschen kennen inzwischen die Erfahrung: 30 bis 60 Minuten reglos in einer engen Röhre zu liegen und dabei lautem rhythmischen Pochen oder Rattern ausgesetzt zu sein. Die Magnetresonanztomographie (MRT) oder auch Kernspintomographie, wie die Untersuchungsmethode heißt, hat sich zu einem der wichtigsten Verfahren entwickelt, Bilder aus dem Körperinneren zu gewinnen, und erreicht dabei normalerweise eine räumliche Auflösung von etwa einem halben Millimeter. Das Ausharren in der Röhre ist sicher nicht angenehm – besonders für Klaustrophobiker –, aber es gibt weitaus schlimmere und belastendere medizinische Untersuchungen, die weniger aufschlussreiche Ergebnisse liefern. Außerdem arbeiten Medizintechniker daran, den Lärmpegel zu senken und »offene« Geräte zu entwickeln, bei denen der Patient freien Blick auf seine Umgebung hat.

Die MRT erzielt besonders in weichen Geweben wie dem Gehirn hohe Kontraste und kommt ohne gesundheitsschädliche ionisierende Strahlung aus – beides Vorteile gegenüber den länger bekannten Röntgen- oder nuklearmedizinischen Methoden. Der Patient wird lediglich statischen und niederfrequenten Magnetfeldern sowie hochfrequenten elektromagnetischen Feldern ausgesetzt. Dabei kann sich zwar das Gewebe erwärmen; der Effekt ist jedoch harmlos, wenn bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden.

Heute lässt sich die Zeit für eine Einzelaufnahme auf weniger als eine Sekunde drücken, sodass zum Beispiel das Schlagen des Herzens oder Gelenkbewegungen für die orthopädische Diagnostik darstellbar sind. Generell wandelt sich das Verfahren zunehmend von der ursprünglich rein anatomischen zur physiologischen Bildgebung. So steht etwa die Messung der lokalen Gewebetemperatur, Blutflussgeschwindigkeit, Gewebeelastizität oder Sauerstoffkonzentration an der Schwelle zur klinischen Praxis.

Chemische Analysen sind ebenso möglich wie Messungen der Aktivität in einzelnen Hirnregionen. Mit der MRT lassen sich Gefäßbäume und sogar Nervenfasern im Gehirn sichtbar machen. Kontrastmittel sind nicht nötig, aber bei manchen diagnostischen Fragestellungen hilfreich. Weil man auch die Konzentration solcher eingebrachten Stoffe bestimmen kann, eröffnet das Verfahren aussichtsreiche neue Möglichkeiten im aufkommenden Gebiet der molekularen Bildgebung. Dabei vermitteln Markierungssubstanzen, die sich an spezifische Stellen im Körper anlagern, Einsichten in biochemische Vorgänge in der Zelle.

Aus all diesen Gründen ist die MRT heute aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzudenken. Etwa 60 Millionen Untersuchungen werden jährlich an den rund 22 000 installierten Tomographen weltweit durchgeführt, überwiegend im Bereich der Neurologie und Orthopädie. Angesichts dessen war die Vergabe eines Nobelpreises für zwei der wichtigsten Pioniere des Verfahrens längst überfällig.

DPA

AP

Paul C. Lauterbur (links) von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign und Sir Peter Mansfield von der Universität Nottingham erhielten den Medizin-Nobelpreis für ihre Pionierleistungen auf dem Gebiet der Magnetresonanztomographie.

Analogie zur Gitarre

Wie funktioniert die MRT? Mit ein wenig Fantasie kann man sie mit dem Spielen einer Gitarre vergleichen. An die Stelle der schwingenden Saiten treten dabei in der Regel Wasserstoffkerne, also Protonen, die im menschlichen Körper in hoher Dichte vorliegen. Sie haben wegen ihrer Eigendrehung, dem so genannten Spin, ein magnetisches Moment und verhalten sich daher ähnlich wie kleine Stabmagnete.

Gitarrensaiten müssen gespannt werden, um schwingen zu können. Diese Aufgabe übernimmt bei der MRT ein starkes statisches Magnetfeld von einigen Tesla (ein Tesla entspricht ungefähr der 25 000fachen Stärke des Erdmagnetfeldes), das die kleinen Stabmagnete entlang

UNIVERSITÄT ZÜRICH

Magnetresonanztomographen bestehen gewöhnlich aus einer Röhre, in die der Patient auf einem Schlitten hineingeschoben wird. Moderne Geräte wie dieses an der Universität Zürich arbeiten mit einer Feldstärke von drei Tesla.

seiner Feldlinien ausrichtet. Dem Zupfen der Saite entspricht das Senden eines elektromagnetischen Hochfrequenzpulses. Er kippt die parallel zum Feld orientierten Wasserstoffkerne und bringt sie dadurch zum Kreiseln. Infolgedessen senden sie ihrerseits hochfrequente elektromagnetische Wellen aus, bis ihre Rotation abgeklungen und die ursprüngliche Ruhelage wieder erreicht ist. Diese Wellen induzieren in den »Ohren« des Tomographen – den Empfangsspulen – eine messbare Spannung: das Signal.

Da die Saiten einer Gitarre verschieden stark gespannt sind, unterscheidet sich die Frequenz, mit der sie schwingen. Daran erkennt das geübte Ohr, welche gerade gezupft wurde. Auch bei der MRT wird die Herkunft der Signale über eine Frequenzanalyse ermittelt. Für das verschieden starke »Spannen« der Protonen sorgen hier so genannte Gradientenfelder, die dem Hauptmagnetfeld einen schwach linearen Verlauf in der Größenordnung einiger 0,01 Tesla pro Meter geben.

Der außergewöhnliche Bildkontrast kommt bei der MRT allerdings nicht, wie nahe läge, dadurch zu Stande, dass die einzelnen Körperregionen verschieden intensive Signale liefern, weil sich ihre Protonendichte unterscheidet. Gemessen werden vielmehr die Abklingzeiten des Signals (»Relaxationszeiten«), da sie wesentlich stärker mit dem Gewebetyp variieren. Auf die Gitarre übertragen hieße das: Nicht die unterschiedliche Lautstärke der von den einzelnen Saiten erzeugten Töne wird im Bild dargestellt, sondern die Zeit, mit der sie verklingen.

»Tief ist der Brunnen der Vergangenheit«, schreibt Thomas Mann. Auch die Wurzeln der MRT reichen weit zurück und sind schwer exakt zu bestimmen. Liegt ihr Ursprung bei William Gilbert, der im Jahr 1600 sein bahnbrechendes Werk »De Magnete« veröffentlichte? Oder doch erst bei Jean-Baptiste-Joseph Fourier, der Anfang des 19. Jahrhunderts grundlegende Arbeiten zur Frequenzanalyse erbrachte, die für die MRT unerlässlich ist? Oder sollte man die Geschichte des Verfahrens bei Nicola Tesla beginnen lassen, der im gleichen Jahrhundert die dafür essenziellen hohen Magnetfelder erforschte?

Erste Aufnahme: eine Muschel

Einen Meilenstein bildete zweifellos Anfang des 20. Jahrhunderts die Entdeckung der Bestandteile des Atoms und ihrer magnetischen Eigenschaften. Im Jahre 1946 gelang es Felix Bloch und Edward Mills Purcell (Physik-Nobelpreis 1952) unabhängig voneinander, gezielt eine magnetische Resonanz von Atomkernen zu erzeugen – ein weiterer, wichtiger Schritt in Richtung MRT. Zunächst eroberte sich diese Technik allerdings den Bereich der Strukturbestimmung und zerstörungsfreien Analyse in der Chemie.

Anfang der 1970er Jahre erkannte dann Raymond Damadian am New York Downstate Health Sciences Center in Brooklyn, dass sich die Relaxationszeiten von gesundem und Tumorgewebe unterscheiden. Roger Gabillard von der Universität Lille (Frankreich) diskutierte als Erster die Möglichkeit, durch inhomogene Magnetfelder die Magnetresonanz auf einzelne Stellen im zu untersuchenden Objekt zu lokalisieren und dieses dann Punkt für Punkt zu analysieren. Allerdings hatten die so erhaltenen Bilder noch eine sehr grobe Auflösung und erforderten inakzeptabel lange Messzeiten.

In dieser Situation schaffte der eine der beiden diesjährigen Nobelpreisträger den Durchbruch zu einer praktikab- ▷

WEIHNACHTSSTRESS? GESCHENKT!

Die Welt ist voller Fragen, voller ungelöster Rätsel, aber auch voller faszinierender Erkenntnisse. Da ist es gut, wenn man Überblick hat, fundierte Antworten erhält und vor allem: wenn man davon profitieren kann – im Beruf oder in der Freizeit, im Gespräch mit Kollegen oder Freunden.

WISSEN^4 – zum Verschenken oder Selberlesen:

Spektrum DER WISSENSCHAFT — Das ganze Spektrum der Wissenschaft

Gehirn&Geist — Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung

ASTRONOMIE HEUTE — Das populäre Magazin für Astronomie und Raumfahrt

STERNE UND **WELTRAUM** — Information und Kompetenz in Sachen Astronomie und Weltraumforschung

Und als Dankeschön für Ihre Bestellung gibt es gratis eine Stoppuhr mit Alarm, Datumsanzeige, Notizblock und Kugelschreiber.

Zum Bestellen einfach hier Ihre(n) Favoriten ankreuzen und die Karte an die angegebene Adresse schicken.

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft Leserservice, Tel.: (06221)9126-743, Fax: -751, E-Mail: marketing@spektrum.com; www.spektrum.de

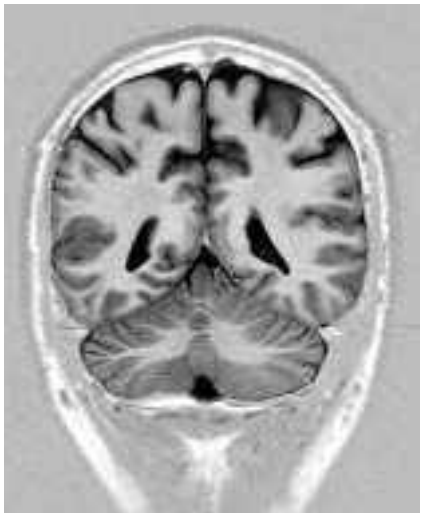
▷ len Bildgebung: der Chemiker Paul C. Lauterbur, damals an der New York University in Stony Brook. Indem er die oben erwähnten Gradientenfelder einführte, schuf er die Grundlage für die heute üblichen schnellen und hochauflösenden MRT-Verfahren. Unter seiner Regie entstand 1973 auch das erste Magnetresonanz-Bild eines lebenden Wesens – einer Muschel. Lauterbur nannte sein Verfahren »Zeugmatographie« (nach griechisch *zeugma*, Gespann), weil dabei das Hauptmagnetfeld und die Gradientenfelder gewissermaßen zusammengespannt werden.

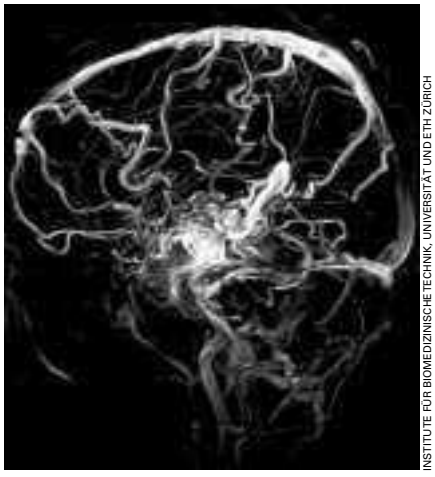
Der zweite Preisträger, der Physiker Peter Mansfield, entwickelte mit seinen Mitarbeitern an der Universität Nottingham im Jahre 1974 eine Methode, gezielt einzelne Schichten des untersuchten Objekts abzubilden. Mit ihr gelang ihm dann 1977 die erste Aufnahme an einem Menschen: ein Querschnitt durch einen Finger. Sein zweites großes Verdienst besteht darin, dass er die MRT erheblich beschleunigte, indem er gegen Ende der 1970er Jahre die Echo-Technik zu einer der wichtigsten Formen der MRT-Echtzeitmessung erweiterte. Was ist darunter zu verstehen?

Während die Protonen unmittelbar nach der Anregung mit dem Hochfrequenzpuls synchron rotieren, geraten sie auf Grund kleiner Inhomogenitäten im Magnetfeld relativ bald aus dem Gleichtakt. Als Folge davon verstärken sich die von ihnen abgegebenen elektromagnetischen Wellen nicht mehr, sondern löschen einander in zunehmendem Maße aus. Deshalb erlischt das Signal, lange bevor die Anregung abgeklungen ist und die Protonen wieder zur Ruhe gekommen sind. Erst dann aber ist eine neue Anregung möglich, was lange Wartezeiten zwischen den Messungen bedingt.

Wiederbelebung des erstorbenen Signals

Man kann die Protonen jedoch, wie schon 1950 Erwin L. Hahn an der Universität von Illinois in Urbana-Champaign erkannte, auch vorher wieder in Gleichtakt bringen, wenn man – zum Beispiel mit einem neuen Hochfrequenzpuls geeigneter Intensität – ihre Rotationsrichtung umkehrt (Spektrum der Wissenschaft 2/1985, S. 62). Dadurch lässt sich das erstorbene Signal bereits nach kurzer Zeit gleichsam als Echo wiederbeleben und für die nächste Messung nutzen. Mansfield entwickelte eine Methode, mehrere solche Echos hintereinander zu erzeugen und dadurch den Abstand zwischen den Messungen drastisch zu verkürzen.





INSTITUTE FÜR BIOMEDIZINISCHE TECHNIK, UNIVERSITÄT UND ETH ZÜRICH

Bei der Magnetresonanztomographie (MRT) werden üblicherweise die Abklingzeiten magnetischer Anregungen von Atomkernen (meist Protonen) gemessen und schichtweise dargestellt. Da sie vom chemischen Umfeld abhängen, lassen sich verschiedene Gewebetypen unterscheiden – so die graue und weiße Hirnsubstanz in einer Schichtaufnahme vom Gehirn (oben). Inzwischen bietet die MRT aber auch viele weitere Möglichkeiten wie die dreidimensionale Darstellung von Blutgefäßen (unten).

Einen weiteren grundlegenden methodischen Fortschritt in der MRT erreichten schließlich im Jahre 1975 Anil Kumar, Dieter Welti und Richard R. Ernst (Chemie-Nobelpreis 1991) durch die Einführung der Fourier-Transformation. Dies erlaubte eine einfache mathematische Rekonstruktion des Bildes aus den Messdaten, während Lauterbur und Mansfield dafür noch aufwendige Projektionsverfahren brauchten, die sich an die Computertomographie anlehnten und mit rotierenden Gradientenfeldern arbeiteten. Voraussetzung für die Fourier-Transformation war allerdings eine andere Codierung der Ortsinformation, welche die Gruppe um Jim Hutchinson an der Universität Aberdeen 1980 einführte. Sie ist heute unter der leicht saloppen (und schwer erklärbaren) Bezeichnung »spin warp« bekannt.

Unzählige weitere Verbesserungen der MRT folgten – so die Einführung der dreidimensionalen Bildgebung, spezieller Kontrastmittel und paralleler Empfangskanäle. Außerdem ermöglichten technische Fortschritte, die Stärke des Hauptmagnetfeldes erheblich zu steigern. Lag sie beim ersten kommerziellen MR-Tomographen noch bei 0,3 Tesla, erreicht sie bei heutigen Standardgeräten das Zehnfache, und es gibt erste Prototypen für den klinischen Einsatz mit sieben Tesla.

Beide Laureaten sind trotz ihres hohen Alters von 74 bzw. 70 Jahren weiterhin wissenschaftlich aktiv, Lauterbur an der Universität von Illinois, Mansfield an der Universität Nottingham. Auch in jüngster Zeit sah man sie noch auf Fachtagungen vor ihrem Poster stehen und Forschungsergebnisse diskutieren. Man darf gespannt sein, ob sie nach der Verleihung der Nobelpreise noch Zeit für solche Auftritte finden werden.

Die Bedeutung der MRT spiegelt sich auch darin, dass es seit den 1980er Jahren eine ganze Reihe von speziellen Fachzeitschriften für das Gebiet gibt. Auf den Jahrestagungen der Internationalen Gesellschaft für Magnetresonanz in der Medizin treffen sich jährlich Tausende von Ärzten, Ingenieuren und Naturwissenschaftlern aus aller Welt. Diese interdisziplinäre Stellung ist charakteristisch für die MRT und wird auch darin augenfällig, dass die für sie vergebenen Nobelpreise inzwischen alle drei möglichen Disziplinen abdecken: Physik bei Bloch und Purcell, Chemie bei Ernst und nun Medizin – bei dem Chemiker Lauterbur und dem Physiker Mansfield.

Ulrich Katscher ist promovierter Physiker und arbeitet in den Hamburger Laboratorien der Firma Philips an der Weiterentwicklung von MRT-Systemen. ▷

Superflüssige Materie

Der diesjährige Physik-Nobelpreis würdigt Theorien, die wesentlich zum Verständnis von technisch bedeutenden Supraleitern und von anisotropen Supraflüssigkeiten beigetragen haben.

Von Uwe Reichert

Für das tägliche Leben ist es praktisch, als Referenzpunkte der Temperaturskala die Gefrier- und Siedepunkte von Wasser zu nehmen und sie in hundert gleiche Teile zu teilen. Doch physikalisch macht es mehr Sinn, von dieser Celsius- zur Kelvinskala überzugehen: Null Kelvin entspricht dann dem absoluten Nullpunkt (bei –273,16 Grad Celsius), den wir nicht unterschreiten und auch nie wirklich erreichen können. Dabei ist diese absolute Temperaturskala eigentlich eine logarithmische: Zwischen 1 und 2 Kelvin (was einer Energieverdopplung entspricht) hat genauso viel »Physik« Platz wie zwischen 100 und 200 Kelvin. Und zwischen 1 Millikelvin und 1 Kelvin hält die Natur im Prinzip genauso viele Überraschungen bereit wie zwischen 1 Kelvin und 1000 Kelvin.

Deshalb ist die Tieftemperaturphysik ein äußerst ergiebiges Forschungsfeld, auf dem in den letzten hundert Jahren viele verblüffende Phänomene entdeckt wurden. Haben schon früher etliche Tieftemperaturphysiker den Nobelpreis erhalten, so wurden nun erneut wichtige Pioniere auf diesem Gebiet ausgezeichnet: Alexej Alexejewitsch Abrikossow, Witalij Lasarewitsch Ginsburg und Anthony J. Leggett, die in den 1950er beziehungsweise 1970er Jahren das Verhalten bestimmter Klassen von Supraleitern und Supraflüssigkeiten erklärt haben.

Als Supraleiter bezeichnet man Materialien, die elektrischen Strom ohne Widerstand leiten. Eine Supra- oder Superflüssigkeit ist eine Substanz, die ohne Reibung strömt. Beide Effekte sind nur mit Hilfe der Quantenphysik zu verstehen. Die Besonderheit ist hier jedoch, dass sich die Quanteneffekte makroskopisch – also in unseren vertrauten Dimensionen – bemerkbar machen. Bisher sind drei Teilchensysteme erforscht, die solche makroskopischen Quantenerscheinungen zeigen: die Leitungselektronen in gewissen Feststoffen sowie die Atome in flüssigem Helium-3 und -4.

Gemeinsam in denselben Zustand

Auf das Phänomen der Supraleitung stieß der Niederländer Heike Kammerlingh-Onnes 1911. Drei Jahre zuvor war es ihm erstmals gelungen, Helium-4 zu verflüssigen, das bei 4,2 Kelvin siedet. Das sollte sich als Geburtsstunde der Tieftemperaturphysik erweisen (Spektrum der Wissenschaft 2/1990, S. 72).

Der Physiker Pjotr Kapiza von der Universität Moskau und seine Kollegen Jack F. Allen und A. D. Misener von der Universität Cambridge entdeckten 1938 unabhängig voneinander die superflüssige Phase von Helium-4: Die Viskosität der Flüssigkeit sank unterhalb von 2,1 Kelvin auf unmessbar kleine Werte. Dann konnte sie selbst durch winzigste Poren dringen; darin erzeugte Wirbel blieben praktisch unbegrenzt erhalten. Kapizas Institutskollege Lew D. Landau vermochte binnen weniger Monate die Superfluidität zu beschreiben, indem er quantisierte Schallwellen und Wirbel postulierte.

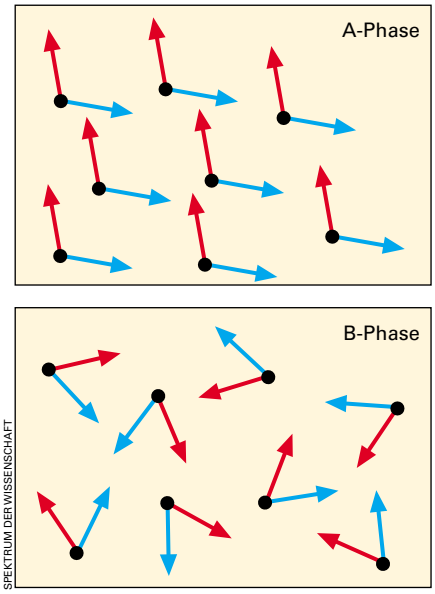
Helium-4 besteht aus je zwei Neutronen und Protonen im Kern. Jede dieser vier Komponenten hat einen Eigendrehimpuls – einen so genannten Spin – mit dem Wert ½. Teilchen mit einem solchen halbzahligen Spin heißen Fermionen und unterliegen einem Ausschließungsprinzip: Jeder Quantenzustand kann nur von einem einzigen Fermion besetzt sein.

Da sich im Helium-4 die Spins der einzelnen Teilchen aber paarweise aufheben, ist der Spin des Kerns null. Teilchen mit ganzzahligem Spin sind Bosonen; sie gehorchen einer Quantenstatistik, die von Satyendra Nath Bose und Albert Einstein beschrieben wurde. Insbesondere unterliegen Bosonen keinem Ausschließungsprinzip, sie können sich in beliebiger Anzahl im selben Zustand tummeln. Bei genügend tiefer Temperatur tun Helium-4-Atome genau das: Sie gehen gemeinsam in den energetisch tiefsten Einteilchenzustand über. Helium-4 ist somit das einfachste Beispiel eines Bose-Einstein-Kondensats. Mit größeren Atomen gelang die Herstellung eines solchen Kondensats erst Mitte der 1990er Jahre – wofür Wolfgang Ketterle, Eric A. Cornell und Carl E. Wieman 2001 den Physik-Nobelpreis erhielten (Spektrum der Wissenschaft 12/2001, S. 12).

Helium-3-Kerne haben ein Neutron weniger als diejenigen von Helium-4. Mit dem resultierenden Kernspin ½ sind sie Fermionen, wodurch sie dem Ausschließungsprinzip unterliegen. Helium-3 kann deshalb nicht auf gleiche Weise denselben Energiezustand besetzen und superflüssig werden wie Helium-4.

Da Helium-3 im natürlichen Helium nur mit einem Anteil von 10^{-6} vorkommt, dauerte es bis zu den 1950er Jahren, bis dieses Isotop in nennenswerter Menge zur Verfügung stand: Für die Herstellung von Wasserstoffbomben erzeugten die USA und die damalige Sowjetunion in speziellen Kernreaktoren das Wasserstoff-Isotop Tritium, das sich mit ▷

Anthony J. Leggett (links) von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign erklärte die superflüssigen Phasen von Helium-3. Witalij L. Ginsburg (rechts) vom Physik-Institut in Moskau und Alexej A. Abrikossow (Mitte), jetzt am Nationallaboratorium Argonne (Illinois), entwickelten Modelle für die technisch wichtigen »Supraleiter der zweiten Art«.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In der A-Phase von superflüssigem Helium-3 sind die Kernspins (rote Pfeile) und Bahndrehimpulse (blaue Pfeile) großräumig geordnet. In der B-Phase hingegen sind die Spins und Bahndrehimpulse ungeordnet, aber ihre relative Orientierung bleibt konstant.

▷ einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren in Helium-3 umwandelt.

Im Jahre 1957 war es John Bardeen, Leon N. Cooper und J. Robert Schrieffer gelungen, das Phänomen der Supraleitung zu erklären. Für die Entwicklung der nach ihnen benannten BCS-Theorie erhielt das Trio 1972 den Nobelpreis. Die Leitungselektronen in Metallen können sich demnach infolge einer subtilen Wechselwirkung zu Paaren zusammenfinden. Diese Cooper-Paare sind keine Fermionen mehr, sondern Bosonen, die als Bose-Einstein-Kondensat einen gemeinsamen Quantenzustand besetzen können. Gehen also Helium-3-Atome vielleicht ebenfalls eine Cooper-Paarung ein und werden dadurch superflüssig?

Wirklich konnten Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson und David M. Lee Ende 1971 den superfluiden Zustand von Helium-3 bei einer Übergangstemperatur von 2,6 Millikelvin nachweisen – wofür sie 1996 den Nobelpreis erhielten (Spektrum der Wissenschaft 8/1990, S. 64, und 12/1996, S. 25). Es zeigten sich sogar zwei verschiedene superflüssige Phasen, A und B genannt, und unter Einwirkung eines Magnetfeldes entsteht noch eine dritte Phase, A_1.

Weil die Helium-4-Atome und die Cooper-Paare in der BCS-Theorie Kugelsymmetrie haben, sind die Eigenschaften des entstehenden Bose-Einstein-Kondensats isotrop, das heißt in allen Richtung gleich. Die Cooper-Paare oder »Quasiteilchen« in Helium-3 haben jedoch eine interne Struktur, wodurch sie innere Freiheitsgrade aufweisen. Dadurch sind viele Eigenschaften von superflüssigem Helium-3 richtungsabhängig – zum Beispiel die Strömungsgeschwindigkeit der gesamten Substanz und die Ausbreitung von Schallwellen in ihr.

Gebrochene Symmetrien

Schon 1937 hatte Landau für bestimmte Phasenübergänge einen »Ordnungsparameter« eingeführt, der im ungeordneten Zustand oberhalb einer kritischen Temperatur null ist, während er im geordneten Zustand unterhalb davon einen endlichen Wert hat. Dieses Konzept ließ sich nun auf Cooper-Paare in Supraflüssigkeiten übertragen, denn hierbei liegt eine neue Ordnung vor, die es im normalen Zustand nicht gibt. Zugleich ändert sich beim Phasenübergang die Symmetrie des Systems: Oberhalb der kritischen Temperatur ist sie höher als darunter.

Diese Symmetrieänderungen – Physiker sprechen von spontaner Symmetriebrechung – untersuchte der diesjährige Preisträger Anthony J. Leggett 1972 genauer. Die inneren Freiheitsgrade im suprafluiden Helium-3 lassen sich durch zwei Vorzugsrichtungen beschreiben: einen Freiheitsgrad bezüglich des Kernspins der Atome und einen bezüglich ihres Bahndrehimpulses. Beide können unabhängig voneinander geordnet sein. Dieser Fall ist in der superflüssigen A-Phase von Helium-3 verwirklicht. Alle Kernspins zeigen in dieselbe Richtung; Gleiches gilt für die Bahndrehimpulse. In der B-Phase liegt, wie Leggett weiter erkannte, eine andere Art der Symmetriebrechung vor: Hier sind im Unterschied zur A-Phase zwar weder die Spins noch die Bahndrehimpulse geordnet, aber beide nehmen in allen Quasiteilchen denselben Winkel zueinander ein.

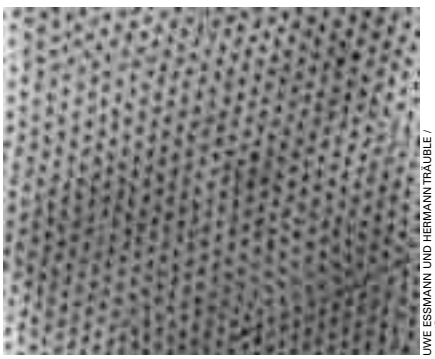
Mit seinen Arbeiten gelang Leggett ein Durchbruch im Verständnis anisotroper Superflüssigkeiten. Er erkannte als Erster, dass im suprafluiden Helium-3 mehrere Symmetrien gleichzeitig gebrochen sind, was von keiner anderen Substanz bekannt war. Auch eine relative Symmetrie war etwas absolut Neues.

Anisotropie spielt auch in den Arbeiten der beiden anderen Preisträger eine Rolle. Denn die BCS-Theorie von 1957 erlaubte zwar die Beschreibung der Supraleitung als isotrope Superflüssigkeit von Leitungselektronen, doch ließ sie sich nicht auf anisotrope Eigenschaften anwenden. Zudem versagte sie bei inhomogenen Superflüssigkeiten, deren Ordnungsparameter – etwa bei Anwesenheit eines Magnetfeldes – räumlich variiert.

Damit taugte sie auch nicht zur Beschreibung so genannter Supraleiter der zweiten Art. Im Unterschied zu solchen der ersten Art, die ein Magnetfeld vollständig verdrängen, können in ihnen Supraleitung und Magnetfelder gemeinsam auftreten. Das ermöglicht heute den Bau leistungsfähiger Magnete. In Kernspintomografen sind Supraleiter der zweiten Art ebenso zu finden wie in den riesigen Magneten, die bei den Teilchenbeschleunigern LHC in Genf und Tesla in Hamburg zum Einsatz kommen.

Die Unterscheidung der beiden Arten von Supraleitern stammt von Ginsburg und Landau. In einem bahnbrechenden Artikel von 1950 interpretierten sie den Ordnungsparameter, der zur quantitativen Behandlung der Supraleitung dient, als makroskopische Wellenfunktion. Durch Einführen eines weiteren, dimensionslosen Parameters konnten sie erstmals das unterschiedliche magnetische Verhalten der beiden Supraleitertypen erklären. Heute weiß man, dass dieser Parameter von zwei charakteristischen Längen abhängt: der Kohärenzlänge, die man als räumliche Ausdehnung eines Cooper-Paares auffassen kann, und der Eindringtiefe des Magnetfeldes in die Oberflächenschicht.

Landau wurde schon 1962 für seine zahlreichen Verdienste um die theoreti-



UWE ESSMANN UND HERMANN TRAUBLE / MPI FÜR METALLFORSCHUNG, STUTTGART

Abrikossow-Gitter aus magnetischen Flusslinien (Wirbeln) konnten 1967 nachgewiesen werden.

sche Physik mit dem Nobelpreis geehrt. Mit der Auszeichnung von Ginsburg würdigt das Nobelkomitee nun auch den zweiten Autor der Pionierarbeit von 1950. Im Jahre 1916 geboren, gilt er als einer der Patriarchen der russischen Physik und hat auf vielen Gebieten große Leistungen vollbracht.

Alexej Abrikossow, damals am Kapiza-Institut für physikalische Probleme in Moskau, nahm sich 1952 eines Problems an, auf das sein Zimmerkollege N. W. Sawaritskij gestoßen war, als er an dünnen supraleitenden Schichten die Vorhersagen der Ginsburg-Landau-Theorie überprüfte. Bei der Abhängigkeit des kritischen Magnetfeldes von der Schichtdicke und der Temperatur fand er Abweichungen.

Geordnete Wirbel

Abrikossow bemerkte, dass die speziellen Eigenschaften der Supraleiter zweiter Art eine Erweiterung der Ginsburg-Landau-Theorie erforderten. Nachdem seine Neuberechnungen die Messungen von Sawaritskij bestätigt hatten, führte er seine Forschungen fort. Er erkannte, dass es Wirbel im Ordnungsparameter von Supraleitern der zweiten Art geben müsse, und beschrieb ihre Bedeutung für das gemeinsame Auftreten von Magnetfeld und superflüssiger Phase. Er legte zudem detailliert dar, wie ein Magnetfeld mit zunehmender Stärke die Supraleitung schließlich unterdrücken könne: Die Wirbel oder Flusslinien, die ein regelmäßiges Gitter bilden, nähern sich einander, bis sich bei einer bestimmten Feldstärke die Kerne der Wirbel überlappen, wodurch das Material in den normalleitenden Zustand zurückkehrt.

Abrikossow konnte seine 1953 aufgestellte Theorie wegen Einwänden Landaus erst 1957 veröffentlichen. Beachtung fand sie dann im Laufe der 1960er Jahre, als supraleitende Materialien mit sehr hohen kritischen Magnetfeldern entdeckt worden waren. Die verdiente Anerkennung kam schließlich, als Uwe Essmann und Hermann Träuble vom Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart 1967 das Wirbelgitter experimentell nachweisen konnten. Die Verleihung des Nobelpreises würdigt Abrikossows Arbeiten nun ein halbes Jahrhundert nach ihrer Entstehung.

Uwe Reichert ist promovierter Physiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

NOBELPREIS FÜR WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

Zeitreihen in der Ökonometrie

Börsenkurse sind prinzipiell nicht vorhersagbar. Für die Entwicklung ausgefeilter Methoden, ihnen und anderen regelmäßig erhobenen Wirtschaftsdaten dennoch mathematische Gesetzmäßigkeiten zu entlocken, gab es in diesem Jahr den Wirtschafts-Nobelpreis.

Von Christoph Pöppe

Anfang der 1980er Jahre setzte das Institut für Wirtschaftswissenschaften der Universität von Kalifornien in San Diego zu einem Höhenflug an, der ihm weltweite Beachtung bescheren sollte. Die Vaterfigur dieser Ideenschmiede ist Clive W. J. Granger, 1934 in Swansea (Wales) geboren, der im Mai dieses Jahres in den Ruhestand trat. Die beiden anderen führenden Köpfe sind Robert F. Engle, Jahrgang 1942, der 1999 zur Universität New York wechselte und seine eigene Beraterfirma betreibt, und Halbert White, der bisher in San Diego verblieben ist. Der Nobelpreis für Wirtschaftwissenschaft geht in diesem Jahr an Granger und Engle und kommt damit recht zeitig, verglichen mit den Verhältnissen in den Naturwissenschaften.

Es geht um einen Allerweltsgegenstand der Ökonometrie, der messenden Wirtschaftswissenschaft: Zeitreihen. Die täglich registrierten Börsen- oder Devisenkurse sind die einfachsten Beispiele, aber auch in größeren Abständen errechnete Wirtschaftsdaten wie das Lohn-, Preis- und Beschäftigungsniveau oder das Bruttosozialprodukt gehören dazu. Für Mathematiker sind das einfach Zahlenfolgen, die sie mit Bezeichnungen wie x_t versehen. Dabei ist x etwa der Name der Aktie, und der Index t zählt die Zeitabschnitte: typischerweise Tage, Monate oder Quartale.

Zeitreihen kann man addieren; aus vielen Aktienkursen wird so ein Aktienindex. Oder man subtrahiert von einer Zeitreihe x_t jeweils die zum nächstfrüheren Zeitpunkt x_{t-1}. Das Ergebnis ist die Zeitreihe der »ersten Differenzen« von x, die nicht die Kurse selbst, sondern ihre täglichen Schwankungen beschreibt.

Ein Ökonometer möchte mit seinen Zeitreihen im Prinzip dasselbe anfangen wie ein Physiker: aus einem chaotischen Datenwust allgemeine Gesetzmäßigkeiten extrahieren. Er hat es nur viel schwerer; denn die Zahlenwerte, die er zu finden hoffen kann, sind nicht universelle Naturkonstanten, sondern beschreiben Eigenschaften der Menschen und der wirtschaftlichen Verhältnisse: Wie viel Aufwand kostet es, eine Einheit des Gutes A zu produzieren? Wie viel ist der Durchschnittsmensch bereit, dafür zu bezahlen? Ab welchem Preis neigt er dazu, darauf zu verzichten oder auf das Ersatzgut B auszuweichen? Wie viel Geld glaubt er für schlechte Zeiten zurücklegen zu sollen? Typischerweise ändern sich diese Parameter innerhalb des Zeitraums, den die Zeitreihe abdeckt.

Clive Granger und die nichtstationären Zeitreihen

Das ist ungünstig für die Analyse; denn eine Zeitreihe, die von solchen Veränderungen beeinflusst wird, ist nicht mehr »stationär«, das heißt, ihre statistischen Eigenschaften sind nicht mehr unabhängig von der Zeit.

Wenn man von einer stationären Zeitreihe einen kurzen Unterabschnitt herausgreift, ergibt sich unabhängig von der Stichprobe stets annähernd dieselbe Verteilung der Werte. Nichtstationären Zeitreihen geht diese Art mathematischen Wohlverhaltens ab – mit der unangenehmen Folge, dass Standard-Analyseverfahren völlig irreführende Ergebnisse liefern. Granger und sein Kollege Paul Newbold hatten da vor dreißig Jahren ein ernüchterndes Urerlebnis: In einer Computersimulation erzeugten sie zwei nichtstationäre, voneinander unabhängige Zeitreihen und stellten fest, dass ein statistischer Test eine Abhängigkeit zwischen ihnen meldete, wo mit Sicherheit keine war.

Grundlage dieses Tests war eine lineare Regression. Das ist der Versuch, zwischen zwei Zeitreihen x_t und y_t eine lineare Beziehung der Form $y_t = a x_t + b$ zu finden, wobei man unterstellt, dass diese Beziehung nur näherungsweise gilt. Man setzt also $y_t = a x_t + b + \varepsilon_t$ und bestimmt die ▷

AP

REUTERS

Clive Granger (links) von der Universität von Kalifornien in San Diego und Robert Engle von der Universität New York entdeckten Gesetzmäßigkeiten in Zeitreihen und wurden dafür mit dem Wirtschafts-Nobelpreis geehrt.

▷ Unbekannten a und b so, dass die »Störung« ε_t möglichst klein wird.

Typischerweise hat eine echte Zeitreihe aus der Wirtschaft eine Eigenschaft, die man integriert nennt: Zwar sind die ersten Differenzen stationär – das Muster der zufälligen Schwankungen von Tag zu Tag ist stets ungefähr dasselbe –, nicht aber die Zeitreihe selbst: Die zufälligen Tagesschwankungen mitteln sich auf die Dauer nicht ganz weg, sondern können sich zu einem erheblichen Nettoeffekt aufaddieren, auch wenn sich an den oben genannten »Konstanten wirtschaftlichen Verhaltens« nichts Wesentliches ändert. Bei integrierten Zeitreihen versagt die lineare Regression.

Dem hat Clive Granger durch sein Konzept der »Kointegration« abgeholfen. Nach wie vor sucht er zwischen zwei Zeitreihen nach Abhängigkeiten der Form $y_t = ax_t + b$; aber Erfolgskriterium ist nicht mehr, dass der Rest $\varepsilon_t = y_t - ax_t - b$ möglichst klein sein soll, sondern dass er seinerseits eine stationäre Zeitreihe ist. Dazu verleibt man die Konstante b dem ε_t auf der linken Seite der Gleichung ein und betrachtet die Zeitreihe $\varepsilon_t = y_t - ax_t$.

Die Suche nach dem »richtigen« Parameter a kann misslingen, indem der statistische Test auf Stationarität von ε_t für alle Werte von a fehlschlägt: Wo keine Abhängigkeit besteht, wird auch keine gemeldet. Im Erfolgsfall aber nennt man die beiden Zeitreihen x_t und y_t »kointegriert«, denn »voneinander abhängig« wäre zu viel gesagt angesichts der Tatsache, dass die Abweichung $y_t - ax_t$ von der exakten Abhängigkeit im Allgemeinen keineswegs klein ist.

Was bedeutet es denn über die mathematische Definition hinaus für den Anwender, wenn zwei Zeitreihen kointegriert sind? Auch auf diese Frage hat Granger mit formalen mathematischen Mitteln eine Antwort gegeben, und zwar den heute nach ihm benannten Darstellungssatz: Unter gewissen Zusatzvoraussetzungen lassen sich die beiden Zeitreihen in die Form »$x_{t+1} - x_t = p(y_t - ax_t)$ plus weitere stationäre Terme« bringen; Entsprechendes gilt für y_t.

Das bedeutet: Der Zustand $y_t = ax_t$ ist als eine Art ökonomisches Gleichgewicht zu verstehen. Er kommt zwar praktisch nie vor, ist aber gleichwohl bedeutsam, denn es gibt Kräfte, die das System auf das Gleichgewicht hintreiben. Je größer heute, zum Zeitpunkt t, das Ungleichgewicht $y_t - ax_t$ ist, desto größer ist auch der Term $p(y_t - ax_t)$, der als Korrekturglied wirkt, denn das Vorzeichen von p ist so, dass die nächste Kursänderung $x_{t+1} - x_t$ in Richtung auf das Gleichgewicht ausfällt, entsprechend für y_t. Die »weiteren stationären Terme« sind allerdings frei, das System auch vom Gleichgewicht weg zu treiben. Die Existenz eines Gleichgewichts verhindert also nicht, dass die Folge der Ereignisse spannend bleibt.

Die Zahl p ist berechenbar; damit gewinnt man aus der Analyse auch Auskunft darüber, wie stark die Tendenz zum Gleichgewicht ist. Ein praktisches Beispiel ist das Problem der Kaufkraftparität. Eigentlich müsste eine Ware im Land A ungefähr so viel kosten wie im Land B, die Preise mit dem jeweils gültigen Wechselkurs umgerechnet. Denn wenn ein Preis in A höher ist als in B, kann man einen Gewinn erzielen, indem man die entsprechende Ware in Massen von B nach A exportiert; daraufhin gleichen sich durch Verknappung in B und höheres Angebot in A die Preise an. Das ist in diesem Fall die aufs Gleichgewicht hinwirkende Kraft.

Allerdings gibt es große und dauerhafte Abweichungen von der Kaufkraftparität, wie jedem Auslandstouristen auf der Stelle auffällt. Das gilt auch dann, wenn offensichtliche Faktoren wie Zölle und Transportkosten keine Rolle spielen. Die Suche nach den Ursachen fördert vielerlei zu Tage: Wechselkurse schwanken, getrieben durch spekulative Erwartungen, viel zu hektisch, als dass ein Exporteur sie unmittelbar zur Grundlage seiner Planungen machen könnte. Erst von einem langfristigen Trend lässt er sich beeindrucken; entsprechend verzögert sich sein Beitrag zur Wiederherstellung des Gleichgewichts.

Gewisse Waren – ein Grundstück mit Alpenblick, ein Schweizer Bankkonto – sind ihrer Natur nach nicht exportierbar, ihre Preise unterliegen also auch keiner Tendenz zum Gleichgewicht. Mit dem wirtschaftlichen Aufschwung eines bislang armen Landes werden dort die nicht exportierbaren Güter teurer, weil eine angewachsene Kaufkraft tendenziell die Preise steigen lässt, diese Tendenz aber bei den exportierbaren nicht zum Tragen kommt. Dieser Effekt wirkt dem Ausgleich der Preise entgegen.

Noch ist das Thema Gegenstand heftiger Diskussionen; immerhin weiß man durch Schätzung des Faktors p, dass die Halbwertszeit einer Abweichung von der Kaufkraftparität typischerweise zwischen drei und sieben Jahren liegt.

Robert Engle und die Autoregression

Die Arbeiten von Robert Engle befassen sich vornehmlich mit Zeitreihen, bei denen noch nicht einmal die ersten Differenzen als stationär gelten können. Ein Beispiel ist wieder ein Aktienkurs, diesmal aber über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet. Es gibt ruhige und unruhige Zeiten an der Börse; in Letzteren sind die Kursausschläge in beiden Richtungen heftiger, und die »Volatilität« eines Aktienkurses, seine Schwankungsbereitschaft, ist keine Konstante mehr.

Engles Analyse erfasst dieses Phänomen durch Ausdehnen eines guten alten Konzepts auf ein neues Gebiet. Das alte Konzept heißt »Autoregression« (»Rückgriff auf sich selbst«, gemeint ist die eigene Vergangenheit) und dient seit jeher dazu, Zeitreihen zu beschreiben, bei denen der aktuelle Wert bis zu einem gewissen Grad durch die unmittelbar vorangegangenen Werte festgelegt ist, zum Beispiel so: $x_t = ax_{t-1} + bx_{t-2} + cx_{t-3} + \varepsilon_t$. In diesem Fall wäre der aktuelle Wert das gewichtete Mittel aus den letzten drei Tagen plus eine aktuelle »Störung«. Das ist ein geläufiges Phänomen; so haben Preise eine gewisse Trägheit und springen nicht schon deswegen plötzlich, weil gewisse Einflussgrößen das tun.

Über die Störung ε_t macht man gewisse Annahmen, insbesondere darüber,

wie stark ihre Werte streuen, was in der Varianz der Verteilung ausgedrückt wird. Engles Innovation besteht darin, diese Varianz als nicht konstant, sondern variabel anzunehmen: Sie bildet selbst eine Zeitreihe, die allerdings nicht direkt beobachtbar, sondern aus den Grunddaten zu erschließen ist. Man stellt fest, dass auf einen ruhigen Tag (niedrige Varianz) ein ruhiger zu folgen pflegt und auf einen unruhigen (mit hoher Varianz) wieder ein unruhiger. Diese Trägheit der Varianz beschreibt man wie oben mit einem Autoregressionsansatz.

Damit sind die Zutaten des von Engle geschaffenen Modells namens ARCH beisammen. Die Abkürzung steht für einen echten Zungenbrecher: *autoregressive conditional heteroskedasticity*. Die beiden griechischen Bestandteile des letzten Wortes bedeuten »verschieden« und »Streuung«, und *conditional* (»bedingt«) drückt aus, dass die unterschiedlichen Streuungen durch die vergangenen Werte der Streuung bedingt sind.

Das Modell taugt auch für Prognosen, was in der Finanzwelt hoch geschätzt wird. Wohlgemerkt: Eine Kursschwankung ist nicht prognostizierbar (anderenfalls würden sich alle Marktteilnehmer darauf einstellen und durch ihr Verhalten die Prognose widerlegen), wohl aber in gewissen Grenzen deren Betrag, womit leider die interessanteste Information herausgefallen ist: die über das Vorzeichen. Doch auch diese eingeschränkte Information hilft Geldanlegern, sehr viel genauer als zuvor abzuschätzen, mit welchem Risiko ihr Portefeuille belastet ist.

Angegeben wird in der Regel der *value at risk*, der Wert, der auf dem Spiel steht, in dem Sinne, dass ein möglicher Verlust diesen Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von, sagen wir, 95 Prozent nicht übertreffen wird. Die Anlagestrategie muss die Bedingung erfüllen, dass ein Verlust in dieser Höhe noch verschmerzbar ist.

Eine präzisere Schätzung des *value at risk* gibt dem Anleger größere Handlungsmöglichkeiten und damit mehr Gewinnchancen. Kein Wunder, dass eine verallgemeinerte Version von ARCH (»Generalized ARCH« oder GARCH) heute in den meisten Software-Programmen für Anlagestrategien steckt.

Christoph Pöppe hat in Mathematik promoviert und ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. ◁

NACHGEHAKT

Paralleluniversen – reine Spekulation?

Gibt es eine Kopie von Ihnen, die gerade diesen Artikel liest? Sind Sie ein Hologramm? – Ist das Ihr Ernst?

Mit dem ersten Satz begann der Artikel »Paralleluniversen« in unserem Augustheft, mit dem zweiten lockte der Titel im November. Mit dem dritten Satz reagierten – so oder ähnlich – zahlreiche Leser.

Vor allem Max Tegmark, Kosmologe und Quantentheoretiker, provozierte mit seinen Überlegungen zum vierstufigen Multiversum recht ungehaltene Briefe. Aber auch Jacob Bekenstein, renommierter Schöpfer der Entropieformel für Schwarze Löcher, erregte mit seiner »holografischen« These, vielleicht seien wir in Wahrheit Flachlandbewohner und bildeten uns die dritte Dimension nur ein, heftigen Widerspruch. Ob wir uns noch als Spektrum der Wissenschaft verstünden, fragten manche, oder neuerdings als Forum für haltlose Spekulationen?

Tatsächlich grenzen sich die Naturwissenschaften seit je von spekulativer Naturphilosophie ab. Schon Galilei forderte dazu auf, nicht in philosophischen Schriften nach dem richtigen kosmologischen Modell zu suchen, sondern durch ein Fernrohr Planeten und Monde zu beobachten. Doch sind damit kühne gedankliche Schlüsse von vornherein tabu? Giordano Bruno wurde einst für seine – damals rein spekulative – Ahnung von der Unendlichkeit des Universums, mit unzähligen Welten wie der unseren darin, noch auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Tegmark erntet heute für seine Entfernungsschätzung einer Doppelgänger-Erde empörte Leserbriefe.

Die Provokation der Artikel von ihm und Bekenstein besteht darin, dass sie quantenphysikalische und kosmologische Theorien beim Wort nehmen. Sind solche Theorien nur Gedankenspiele? Oder sagen sie mehr über die Wirklichkeit aus, als wir mit unseren Sinnen und dem »gesunden« Menschenverstand zu erfassen vermögen? Unsere Intuition weiß heute wie vor tausend Jahren klipp und klar, dass die Sonne auf steiler Bahn die ruhende und flache Erde umrundet. Spielt nur eine Theorie für Sternengucker mit dem Gedanken, dass die Erde um die Sonne kreist, oder ist das wirklich so?

Der Quantenphysiker Tegmark rechnet mit Zustandsfunktionen. Sie sind für ihn wirklich, obwohl sie sämtliche »möglichen« Messergebnisse enthalten, von denen jeweils nur eines pro Messung »wirklich« herauskommt. Aber was ist hier möglich, was wirklich? Tegmark entledigt sich dieser spekulativen Frage, indem er alles physikalisch Relevante als wirklich behandelt. »Letztlich müssen wir uns entscheiden«, schreibt er, »was wir verschwenderischer und uneleganter finden: viele Welten oder viele Worte.«

Bekenstein schließt aus seiner Berechnung der Entropie Schwarzer Löcher, dass die in einem Volumen maximal enthaltene Information proportional zur Oberfläche dieses Volumens ist. Daraus folgert er, dass die gesamte im Volumen gültige Physik völlig äquivalent zu einer ganz anderen, nur auf der Oberfläche geltenden Physik sein muss. Wiederum kann man auf dem Standpunkt stehen, das sei ein spekulatives Gedankenspiel, bestenfalls geeignet, gewisse Rechenaufgaben für Theoretiker zu erleichtern. Doch Bekenstein nimmt sein Resultat beim Wort und überlegt: Wenn wir physikalisch völlig äquivalent zu einer zweidimensionalen Physik sind, was hindert uns dann an der Folgerung, wir seien wirklich »flach« wie ein holografischer Film?

Es ist eine ironische Konsequenz der antispekulativen Parole »Zu den Sachen selbst!«, dass der zu Beginn der empirischen Naturforschung gegen die Spekulation mobilisierte Augenschein – »Seht doch selbst!« – mit der Zeit immer mehr das Nachsehen hat. Quantenphysik und Kosmologie sind so unanschaulich, dass ihre avanciertesten Theorien wie entrückte Spekulationen anmuten. Doch gerade der Abstand zwischen Intuition und Theorie zeigt, wie weit wir schon gekommen sind.

Michael Springer

Der Autor ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

Ein Universum voll dunkler Rätsel

Im vergangenen Vierteljahrhundert hat die Kosmologie enorme Fortschritte gemacht – und dabei enthüllt, dass das Universum größtenteils aus unsichtbarer Dunkler Materie und rätselhafter Dunkler Energie besteht.

Von Gerhard Börner

Seit 1964 treffen sich Wissenschaftler alle zwei Jahre bei den so genannten Texas-Konferenzen, um astronomische Beobachtungen zu diskutieren, die für die Kosmologie von Bedeutung sind. Diese Zusammenkünfte hatten in Austin (Texas) begonnen, inspiriert durch die kurz vorher erfolgte Entdeckung der Quasare. Was diese weit entfernten, ungeheuer leuchtstarken »quasistellaren Objekte« mit Energie versorgt, war damals noch ein Rätsel; heute vermutet man dahinter Galaxienkerne, die unter ihrer eigenen Schwerkraft zu extrem massereichen Schwarzen Löchern kollabiert sind und gierig umgebende Materie verschlucken. Im Dezember 1978 fand die Texas-Tagung in München statt. Aus den Konferenzpapieren lässt sich recht gut der Stand der Kosmologie vor 25 Jahren ablesen. Für mich war diese Tagung der Einstieg in die kosmologische Forschung.

Schon damals waren sich fast alle Kosmologen einig, dass ein akzeptabler Rahmen für die Theorie des Kosmos durch das »Urknallmodell« vorgegeben war – wie es sein prominentester Gegner, der britische Astronom Sir Fred Hoyle, zunächst abfällig tituliert hatte. In diesem Modell entwickelt sich die kosmische Materie und Strahlung aus einem nahezu strukturlosen, heißen und dichten Frühzustand zu dem komplexen Universum, das wir heute beobachten. Dem gleichmäßigen Anfangszustand sind kleine Störungen überlagert, die schließlich durch ihre Eigengravitation zu Galaxien und Galaxienhaufen werden. Diese Vorstellungen lassen sich mathematisch mit einfachen Lösungen der Einstein'schen Allgemeinen Relativitätstheorie präzisieren. Diese so genannten Friedman-Lemaître-Modelle geben viele Beobachtungen befriedigend wieder. Nicht mehr als zwei Zahlen – die heutige Ausdehnungsrate und die mittlere Massendichte des Kosmos – schienen ausreichend, um die Modelle festzulegen und damit nach Meinung vieler Kosmologen das Universum durch und durch zu kennen.

Es gab damals noch hitzige Diskussionen um die korrekte Messung der Expansionsrate, der Hubble-Konstanten. Um sie zu messen, bestimmt man die Entfernung kosmischer Objekte sowie ihre Fluchtgeschwindigkeit, gegeben durch die Rotverschiebung ihrer Spektrallinien. Entweder 50 oder 100 mit kleinen Unsicherheiten von jeweils zehn Prozent, das war die Streitfrage – ausgedrückt in der etwas eigenwilligen Einheit der Astronomen von Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec (siehe Kasten Seite 30). Anschaulich bedeutet eine Hubble-Konstante von 50, dass eine Galaxie in 100 Megaparsec Entfernung sich scheinbar mit einer Geschwindigkeit von 5000 Kilometer pro Sekunde von uns entfernt. Nur schwache Charaktere plädierten in dieser Debatte für einen Mittelwert, obwohl den Streithähnen klar war, dass die Suche nach einem verlässlichen extragalaktischen Entfernungsmaßstab noch eine Weile weitergehen würde.

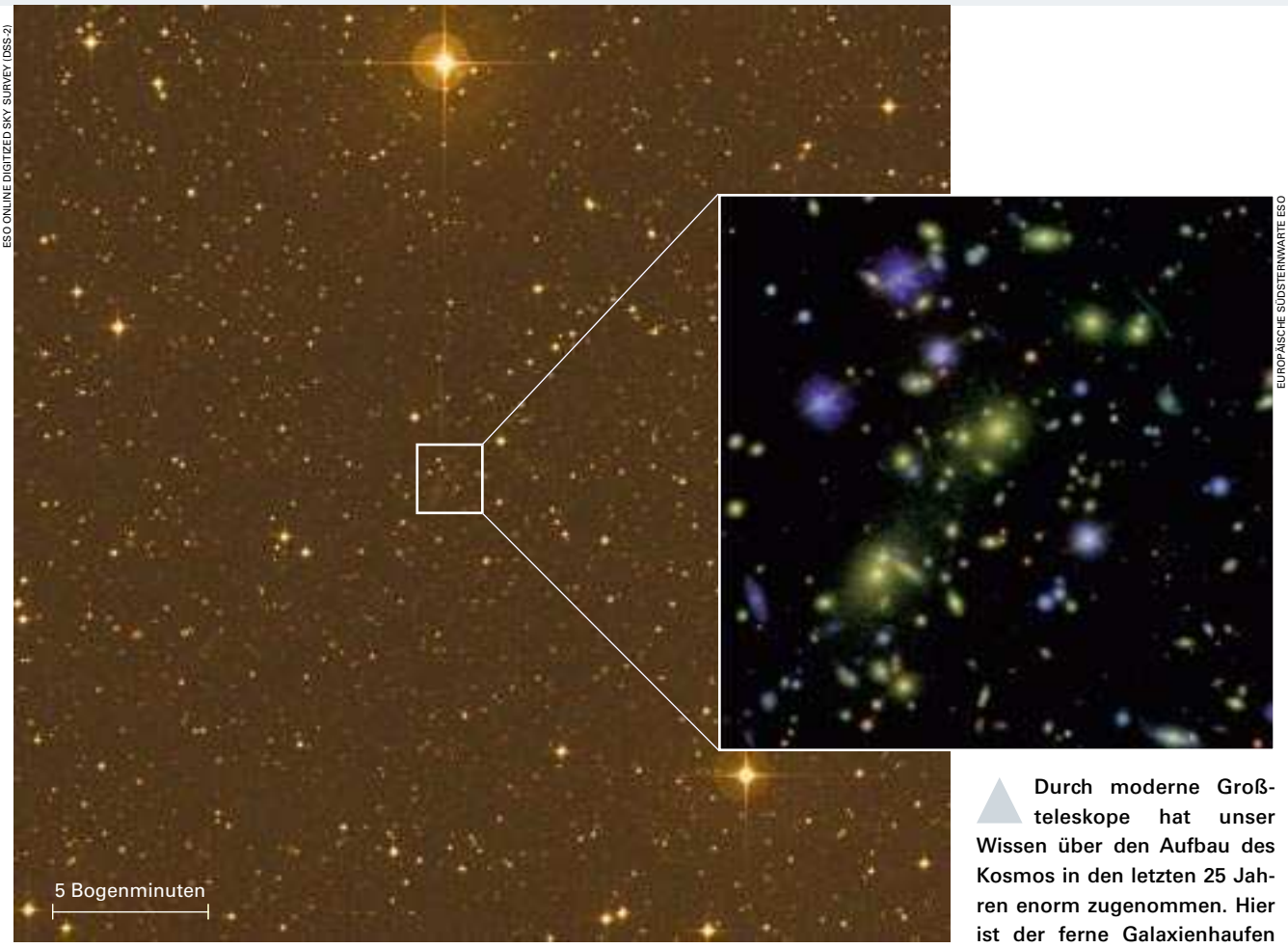
In den letzten Jahren hat ein neuer Versuch, die kosmische Entfernungsskala zu bestimmen, viele Anhänger gefunden und den Streit geschlichtet. Dabei macht man sich die riesige Leuchtkraft bestimmter Typen von Sternexplosionen zu Nutze, der Supernovae von Typ Ia (abgekürzt SNIa). Im Spektrum dieser explodierenden Sterne findet man keine Hinweise auf Wasserstoff, nur die Linien höherer Elemente wie Helium und Kohlenstoff. Der Stern, der sein Dasein durch diese Explosion beendet, hat wahrscheinlich schon eine

SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken
Teil VI: Ultrakalte Atome
Teil VII: Die Chemie beherrschen
Teil VIII: Entzifferung des Genoms
Teil IX: Informationstheorie
Teil X: Sand und Gele
Teil XI: Immunsystem
Teil XII: Kosmologie



ESO ONLINE DIGITIZED SKY SURVEY (DSS-2)

EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE ESO

Durch moderne Großteleskope hat unser Wissen über den Aufbau des Kosmos in den letzten 25 Jahren enorm zugenommen. Hier ist der ferne Galaxienhaufen 1ES0657–55 gezeigt, der auf Grund seiner Masse als Gravitationslinse wirkt und noch fernere Galaxien verzerrt abbildet.

lange Entwicklungszeit hinter sich, und sein Wasserstoffvorrat ist verbraucht. Vermutlich handelt es sich um einen »Weißen Zwerg« – einen kompakten Sternenrest mit dem Radius etwa der Erde und der Masse der Sonne. In der Explosion wird radioaktives Nickel erzeugt, dessen Zerfall die Energie für die Leuchterscheinung liefert. Die Leuchtkraft dieser Supernova steigt rasch an, erreicht innerhalb einiger Stunden ein Maximum und fällt dann wieder ab. Maximum und Abfall der Lichtkurve gestatten eine genaue Bestimmung der Leuchtkraft. Mit dieser Methode ergibt sich für die Hubble-Konstante der Wert 70 mit einer Genauigkeit von zehn Prozent.

»Die Wissenschaft von den zwei Zahlen«

Der Kehrwert der Hubble-Konstanten ist eine für die Ausdehnung des Weltalls charakteristische Zeit. Sie beträgt gemäß der SNIa-Messung etwa 14 Milliarden Jahre. Das bedeutet: Vor rund 14 Milliarden Jahren begann die heute beobachtete Expansion. Damals waren alle Galaxien eng beisammen, und das Universum muss wesentlich anders als heute ausgesehen haben.

Die ältesten Sterne in den Kugelsternhaufen dienen den Astronomen zur Festlegung einer zweiten charakteristischen Zeit. Das Alter dieser Sterne wird auf 10 bis 14 Milliarden Jahre geschätzt. Diese Werte haben sich in den letzten 25 Jahren häufig verändert; noch vor einigen Jahren schien das Sternalter das kosmische Expansionsalter weit zu übertreffen. Die einfachen Urknallmodelle drohten an diesem inneren Widerspruch zu scheitern. Inzwischen sind die Sternmodelle und die Beobachtungen verbessert worden und alles ist wieder im Lot.

In den kosmologischen Modellen vom Friedman-Lemaître-Typ ist das Produkt von Weltalter – näherungsweise gemessen durch das Sternalter – und Hubble-Konstante eine einfache Funktion der Materie und Energie im Kosmos. Vor 25 Jahren sprach man deshalb von der Kosmologie als der »Wissenschaft von den zwei Zahlen«: Messungen der Hubble-Konstanten und des Sternalters (oder der Hubble-Konstanten und der Materiedichte) sollten ausreichen, um das kosmologische Modell völlig festzulegen. Heute wissen die Kosmologen, dass es nicht so einfach geht, denn neben der Materiedichte bestimmen noch andere Dichteparameter die Geschicke des expandierenden Universums. Hinweise darauf finden sie in der Hubble-Relation der SNIa, die für hohe Rotverschiebungen Abweichun- ▷

▷ gen vom gleichförmigen Expansionsgesetz zeigt (siehe Grafik auf Seite 32). Diese Abweichungen werden als Beschleunigung der kosmischen Ausdehnung interpretiert.

1978 schien es noch, als betrage die mittlere Dichte der Materie nur etwa zehn Prozent der so genannten kritischen Dichte, bei welcher das Universum euklidisch, das heißt flach wäre (siehe Kasten unten). Diese Bilanz der kosmischen Energie und Materiedichte hat sich in den letzten 25 Jahren völlig verändert. Tatsächlich gelangen in den letzten Jahren Messungen der kosmischen Mikrowellenstrahlung, die eigentlich all die mühsamen astronomischen Versuche, die kosmologischen Modelle zu vermessen, überflüssig erscheinen lassen. Es hat sich nämlich herausgestellt, dass die gesamte kosmische Geschichte im Strahlungshintergrund eingeprägt ist. Die Astronomen müssen nur noch lernen, dieses himmlische Dokument zu lesen.

EUROPÄISCHE SÜDSTERNWARTE ESO

Dieser ferne Quasar verdankt seine enorme Leuchtkraft benachbarten Galaxien, die durch ihre Gravitationswirkung Materie in ein zentrales, extrem massereiches Schwarzes Loch schleudern.

Stützpfeiler der Urknalltheorie

Im Jahre 1964 entdeckten Arno Penzias und Robert Wilson eine Strahlung im Mikrowellenbereich – eine Wärmestrahlung mit einer Temperatur von 2,73 Kelvin (Grad über dem absoluten Nullpunkt). Beide Forscher erhielten dafür 1978 den Physik-Nobelpreis. Diese kosmische Hintergrundstrahlung ist ein wichtiger Stützpfeiler des Urknallmodells. Die Expansion des Kosmos bedeutet ja, dass in der Vergangenheit der Strahlungshintergrund heißer und komprimierter war als heute. Der Schluss scheint nahezu zwangsläufig, dass die kosmische Entwicklung mit einem heißen, dichten Frühzustand begonnen hat, in dessen Gluthitze Galaxien und Sterne nicht bestehen konnten, sondern als untrennbares Gemisch aus Strahlung und Materie vorlag.

Der kosmische Strahlungshintergrund war 1978 natürlich wohl bekannt, allerdings war noch nicht klar, ob das Spektrum wirklich den von Max Planck für eine ideale Wärmestrahlung vorhergesagten Verlauf zeigte. Dazu waren Messungen außerhalb der Erdatmosphäre, also mit einem Satelliten, notwendig. Der Antrag an die Nasa, den Satelliten Cobe (Cosmic Background Explorer) zu bauen, war gerade gestellt und auf der Münchener Texas-Tagung allseits begrüßt worden. Im November 1989 schließlich wurde Cobe in seine Umlaufbahn gebracht und vermaß zwei Jahre lang das Spektrum der Hintergrundstrahlung in verschiedenen Himmelsrichtungen. Die Temperatur der Wärmestrahlung wurde sehr präzise zu 2,728 ± 0,002 Kelvin bestimmt. Im Rahmen der Messgenauigkeit wurden keine Abweichungen von der Planck'schen Form des Strahlungsspektrums gefunden. Der Strahlungshintergrund entspricht damit nahezu ideal der Vorstellung einer strukturlosen, gleichförmigen Urexplosion.

In der Frühzeit des Universums enthielt die kosmische Hintergrundstrahlung genügend viele energiereiche Lichtquanten (Photonen), um alle Wasserstoffatome in ionisiertem Zustand zu halten. Dies war auch dann noch der Fall, als die mittlere Strahlungstemperatur bis auf etwa 3000 Kelvin abgesunken war. Jene Zeit, etwa 400 000 Jahre nach dem Urknall, entspricht einer Rotverschiebung von $z = 1100$; das heißt, der mittlere Abstand zweier Galaxien, die sich mit der kosmischen Expansion bewegten, betrug nur 1/1100 des heutigen Abstands. Damals hatte noch etwa ein Milliardstel der Photonen im Strahlungshintergrund eine größere Energie als die Ionisationsenergie des Wasserstoffs von 13,6 Elektronenvolt. Das reichte aus, um die vorhandenen Wasserstoffkerne an der Verbindung mit den Elektronen zu hindern. Die Materie bestand aus einem ziemlich homogenen, heißen Plasma aus Atomkernen und Elektronen, in dem die Strahlung durch Streuung der Photonen an den frei beweglichen Elektronen gefangen blieb.

Mit weiterer Abkühlung infolge der Expansion entstanden in diesem heißen Urbrei erste Strukturen. Bei Temperaturen unterhalb von 3000 Kelvin begannen die freien Elektronen, sich mit den Atomkernen zu Wasserstoff und Helium zu verbinden. In dieser Epoche der so genannten Rekombination wurde das Universum durchsichtig, denn die Photonen wurden an den nun gebundenen Elektronen kaum noch gestreut. Dies geschah in relativ kurzer Zeit: Die Rekombinationsphase dauerte etwa 40 000 Jahre, entsprechend einem Rot-

DAS NEUE WELTMODELL

Die **Hubble-Konstante** H_0 ist ein Maß für die Expansionsgeschwindigkeit des Universums und wird in Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec gemessen. Das kosmologische Entfernungsmaß Megaparsec entspricht 3,26 Millionen Lichtjahren oder 30 Trillionen Kilometern.

Der Kehrwert H_0^{-1} hat die Dimension einer Zeit. Hätte sich das Universum seit dem Urknall mit der gegenwärtigen Expansionsrate ausgedehnt, so wäre H_0^{-1} gleich dem **Weltalter** t_0. Tatsächlich aber variierte die Expansionsrate im Laufe der Geschichte des Alls. Beispielsweise war sie in der **inflationären Phase** kurz nach dem Urknall wesentlich größer als heute.

Das Produkt von Weltalter t_0 und Hubble-Konstante H_0 ist in den kosmologischen Modellen eine einfache Funktion der **Materie- und Energie-Dichteparameter** Ω_B, Ω_m, Ω_Λ, wobei Ω_B die »normale« baryonische Materie, Ω_m die Dunkle Materie und Ω_Λ die Dunkle Energie bezeichnet:

$$H_0 \times t_0 = f(\Omega_B, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$$

Aus der Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung geht hervor, dass das Universum flach ist und die Summe aller Dichteparameter, Ω_{tot}, exakt gleich eins sein muss:

$$\Omega_{tot} = \Omega_B + \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$$

Da Ω_B, die Dichte der baryonischen Materie, nur 0,045 ausmacht und Ω_m, die Dunkle Materie, nur 0,27 beiträgt, entfällt der Löwenanteil auf die Dunkle Energie Ω_Λ: Er muss bei rund 0,7 liegen.

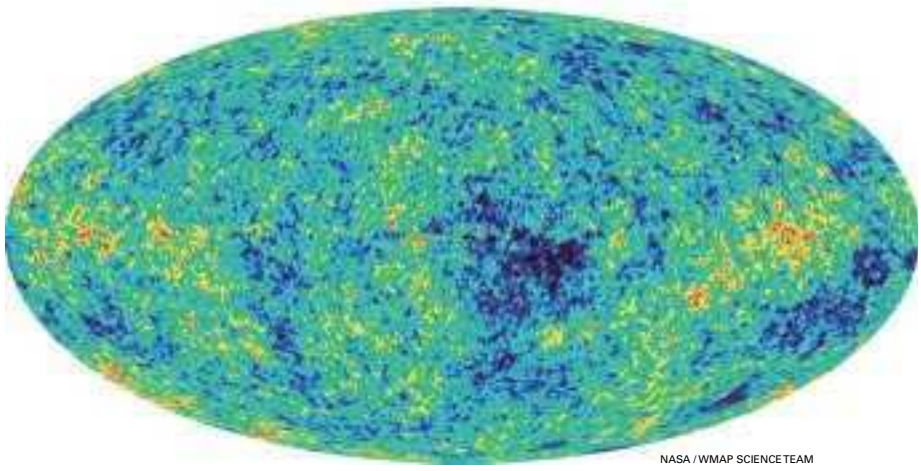
verschiebungsintervall von $\Delta z = 80$. Im Spektrum des Strahlungshintergrunds hat dieser Prozess überhaupt keine Spuren hinterlassen. Die Energie der Photonen und die Strahlungstemperatur müssen somit auch während der 40 000 Jahre perfekt der kosmischen Expansion gefolgt sein. Deshalb blieb die Form der Planck'schen Kurve unverändert. Für mich bildet die Bestätigung des Expansionsverhaltens während der Rekombinationsphase ein besonders überzeugendes Indiz für die Gültigkeit des einfachen Urknallmodells.

Aus der kosmischen Hintergrundstrahlung lässt sich aber noch weit mehr herauslesen. Eigentlich sollten sich ja schon vor der Rekombinationszeit erste schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen als Vorläufer der Galaxien gebildet haben. Das müsste sich in Unregelmäßigkeiten des Strahlungshintergrunds widerspiegeln. Vor 25 Jahren hatte man aber trotz intensiver experimenteller Suche und ständig gesteigerter Sensitivität der Messinstrumente nichts dergleichen gefunden – bis auf ein Signal, das einer Temperaturschwankung von rund 3×10^{-3} Kelvin entsprach. Das konnte man aber auch als Folge der Eigenbewegung der Erde gegenüber dem Strahlungshintergrund interpretieren. Abgesehen davon war der kosmische Mikrowellen-Himmel strukturlos. Dieses Resultat passte zwar zu den theoretischen Modellen, stand aber im Gegensatz zu astronomischen Beobachtungen.

Schwingungen im frühen Kosmos

Im Modell wird die Materie als gleichförmig verteilt idealisiert – aber tatsächlich beobachten wir, dass die leuchtende Materie in scharf umgrenzten Galaxien organisiert ist. Beides lässt sich nur vereinbaren, wenn man die Entstehung der Galaxien als Entwicklungsprozess betrachtet, in dem die heute beobachteten Strukturen aus anfänglich sehr kleinen Schwankungen der Materie- und Strahlungsverteilung entstanden sind. Die zunächst nur schwach ausgeprägten Inhomogenitäten der kosmischen Ursuppe treten auf Grund ihrer eigenen Schwerkraft im Laufe der Zeit immer deutlicher hervor, bis sie sich von der allgemeinen Expansion abtrennen und schließlich zu dichten Objekten zusammenballen.

Diese einleuchtende Idee hatte schon vor 25 Jahren viele Anhänger. Das Problem war nur, dass lange Zeit keine Spuren der Anfangsschwankungen gefunden wurden. Erst mit einem Instrument an Bord des Cobe-Satelliten gelang es im Jahre 1992, eine fleckige Struktur am Himmel aufzuspüren – Winkelbereiche von etwa zehn Grad Ausdehnung mit Temperaturabweichungen von maximal 30 millionstel Kelvin. Die Kosmologen atmeten erleichtert auf. Allerdings reichten die von Cobe registrierten Signale nicht aus, um ohne weiteres die Entstehung von Galaxien zu erklären. Selbst die maximal mögliche Verstärkung der Inhomogenitäten – um einen Faktor 1100 von der Rekombinationszeit bis heute – hätte nur zu Schwankungen der Materiedichte im Prozentbereich geführt und den Kosmos in einem allzu gleichförmigen Zustand belassen.



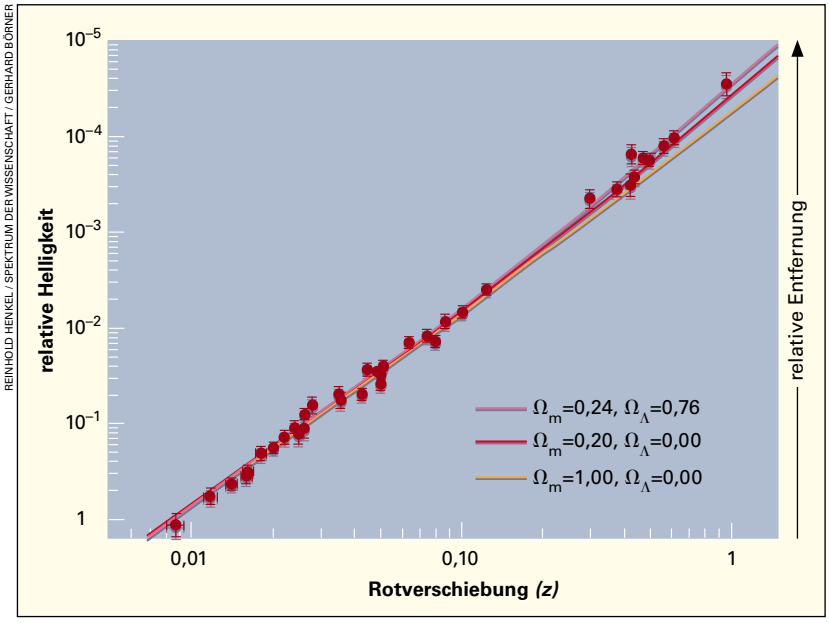
NASA / WMAP SCIENCE TEAM

Die vom Satelliten WMAP gemessene Mikrowellenkarte des Himmels zeigt Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung im Bereich von millionstel Kelvin. Die »wärmeren« Regionen sind rot, die »kälteren« blau kodiert.

Doch aus diesem Dilemma bot sich ein Ausweg, der vor 25 Jahren noch nicht erkennbar war: Die Kosmologen postulierten die Existenz der Dunklen Materie. Im Gegensatz zur »normalen«, leuchtenden Materie treten die hypothetischen Teilchen der Dunklen Materie mit Strahlung nicht in direkte Wechselwirkung. Deshalb können sie gleichsam durch das Nadelöhr der winzigen Hintergrundstrahlungsschwankungen schlüpfen und sich zu größeren Gebilden zusammenballen. So vermag die Dunkle Materie Schwerkraftzentren vorzugeben, in denen die normale Materie sich ansammelt.

Diesem Szenario zufolge bildeten sich in der Dunklen Materie schon kurz vor der Rekombinationszeit erste, schwach ausgeprägte Massenkonzentrationen. Das »normale« Plasma aus Photonen (Strahlungsquanten) und Baryonen (Partikeln wie Proton und Neutron) folgte diesen Kondensationen, doch der Ten- ▷

▷ denz der Baryonen zum Zusammenballen stand der Strahlungsdruck der Photonen entgegen, der die Plasmawolken auseinander zu treiben suchte. Im Widerstreit dieser Kräfte begannen die Plasmawolken zu schwingen – wie Schallwellen in einem Gas. Die größte schwingende Plasmawolke war bis zur Rekombinationszeit gerade einmal von einer Schallwelle durchlaufen worden. Noch größere Wolken konnten noch keinen Druck aufbauen, sondern folgten einfach der Schwerkraft und zogen sich langsam zusammen. Kleinere Wolken oszillierten mit höherer Frequenz. Alle Schwingungen waren in Phase – perfekt synchronisiert durch den Urknall.



Das Hubble-Diagramm der Supernovae vom Typ Ia zeigt für große Rotverschiebungen Werte für die Helligkeit, die darauf schließen lassen, dass sich die Expansionsbewegung des Universums beschleunigt.

Bei der Kontraktion und Verdichtung wurde das Photonengas heißer; während der Verdünnung, beim Auseinanderlaufen, kühlte es sich ab. Zur Rekombinationszeit verließen die Photonen die Plasmawolken – und finden sich heute mit etwas unterschiedlichen Temperaturen in den Detektoren der Astronomen wieder. Die Temperaturschwankungen der dichteren und dünneren Plasmawolken zeigen sich demnach als wärmere und kühlere Bereiche des Strahlungshintergrunds am Himmel.

Von Cobe zu WMAP

Die Messresultate des Satelliten Cobe passten zwar im Prinzip zu diesem Modell, aber den Instrumenten an Bord mangelte es an der nötigen Sehschärfe: Ein Messpunkt entsprach einem Bereich von mehreren Grad Ausdehnung am Himmel. Beim Blick zur Erde wäre ganz Bayern für Cobe nur ein Messpunkt gewesen.

Mittlerweile befindet sich der amerikanische Satellit WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) in seiner Beobachtungsposition in 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 8). Dieser Satellit verbessert die Winkelauflösung auf 15 Bogenminuten. Erste Resultate wurden kürzlich veröffentlicht: Wie schon bei vorhergehenden Ballonmessungen lässt sich in den gemittelten Temperaturschwankungen eine Abfolge von wohl definierten Maxima identifizieren (Grafik rechts). Das erste Maximum entspricht der größten akustischen Schwingung – sie erfasst den Bereich, den eine Schallwelle vom Urknall bis zur Rekombinationszeit zurücklegen konnte. Diese Länge lässt sich daraus zu ungefähr 220 000 Lichtjahren berechnen.

Signale eines flachen Universums

Am Strahlungshimmel erscheint diese Schwingung als Signal mit einer Winkelausdehnung von etwa einem Grad. Der Winkel, unter dem man eine bestimmte Strecke sieht, wird durch die Krümmung des Raumes festgelegt. Bei positiver Krümmung nimmt dieselbe Strecke einen größeren Winkel ein als bei Krümmung null, bei negativer Krümmung einen kleineren. Der gemessene Wert passt zur Krümmung null – das Universum gehorcht der euklidischen Geometrie, es ist flach. Krümmung null heißt zugleich, dass der Parameter der gesamten Massen- und Energiedichte Ω_{tot} den kritischen Wert eins erreicht (siehe Glossar). Die genaue Analyse ergibt $\Omega_{tot} = 1{,}02 \pm 0{,}02$.

In der akustischen Schwingung folgt auf die Verdichtung eine Verdünnung; sie erscheint im Diagramm, weil dort das Quadrat der Schwankungen aufgetragen ist, als zweites Maximum. Je mehr baryonische Materie vorhanden ist, desto deutlicher wird die Plasmawolke durch die Gravitation der Dunklen Materie verdichtet. Die relative Höhe der Maxima ermöglicht die Festlegung der baryonischen Materie auf 4,5 Prozent der kritischen Dichte ($\Omega_B = 0{,}045$) und der Dunklen Materie auf 27 Prozent ($\Omega_m = 0{,}27$). Diese Werte stehen in Einklang mit anderen astronomischen Messungen; die Unsicherheiten betragen jeweils weniger als zehn Prozent.

Schon jetzt lässt sich das überraschende Ergebnis festhalten, dass baryonische und Dunkle Materie zusammen bei weitem nicht den Wert $\Omega_{tot} = 1$ erreichen. Es muss also eine weitere Komponente geben, die für dieses Defizit geradesteht. Sie muss sehr gleichmäßig verteilt sein und darf keine Klumpung auf der Skala von Galaxienhaufen oder darunter aufweisen. Eine aus irgendwelchen Teilchen, wenn auch noch unbekannten, bestehende Materie kommt dafür nicht in Frage. Vielmehr muss eine nahezu konstante kosmische Energiedichte vorhanden sein, welche die feh-

lenden siebzig Prozent beisteuert (siehe Grafik auf Seite 34).

Nun haben die Kosmologen zwar das einfache Urknallmodell ziemlich genau vermessen, doch ihre Arbeit ist damit noch längst nicht zu Ende. So einfach die Geometrie des Kosmos erscheint, so geheimnisvoll bleibt seine materielle Zusammensetzung. Nur fünf Prozent der Materie und Energiedichte im Kosmos sind uns bekannt: die normale baryonische Materie, aus der die Elemente und auch wir selbst aufgebaut sind. Dies ist durch die Analysen des Strahlungshintergrunds besonders deutlich geworden. Es gab aber schon vorher Hinweise durch andere astronomische Beobachtungen.

So wurden die Häufigkeiten der leichten Elemente – Deuterium, Helium und Lithium – mit immer höherer Präzision bestimmt. Diese Elemente entstanden in den ersten Minuten nach dem Urknall in genau berechenbaren Mengen, die von der Dichte der Baryonen abhängen. Daraus lassen sich im Rahmen des kosmologischen Modells die heute erwarteten Häufigkeiten ermitteln und mit den gemessenen Werten vergleichen. Das führt auf Schätzungen für die baryonische Materie von etwa fünf Prozent der kritischen Dichte.

Viel Dunkle Materie – und noch mehr Dunkle Energie

Die Astronomen wiederum fanden heraus, dass in den Galaxien dunkle Massen die Bewegung der Sterne wesentlich prägen. Während die leuchtende Materie in den Galaxien nur 0,5 Prozent der kritischen Dichte erreicht, steigt der Beitrag durch die Dunkle Materie auf etwa 1,5 Prozent. Die Galaxien selbst sind meist in größere Strukturen eingebunden. Diese Galaxienhaufen eignen sich besonders, um noch mehr kosmische Masse in die Bilanz einzubringen. Die Geschwindigkeiten der Galaxien in diesen Haufen sind so groß, dass sie auseinander fliegen müssten, falls nicht zusätzliche dunkle Massen vorhanden sind, die sie zusammenhalten. Die exakten Daten erzwingen einen hohen Anteil an Dunkler Materie für diese Objekte. Damit werden 15 Prozent der kritischen Dichte erreicht.

Dasselbe Ergebnis erhält man aus einer Analyse der Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen. Ein 100 Millionen Grad heißes Gas zwischen den Galaxien sendet diese Strahlung aus. Damit das Gas nicht entweicht, muss es durch die Schwerkraft zusätzlicher, nicht sichtbarer Massen gebunden werden. Viele Galaxienhaufen wirken außerdem als Gravitationslinsen – das heißt, sie lenken die Lichtstrahlen ab, die von weiter entfernten Galaxien durch den Haufen zu uns gelangen, und verzerren so das Bild der Quellgalaxie. Die Art der Verzerrung erlaubt Rückschlüsse auf die Massenverteilung in den Galaxienhaufen. Auch diese Beobachtungen führen auf den gleichen Anteil an Dunkler Materie.

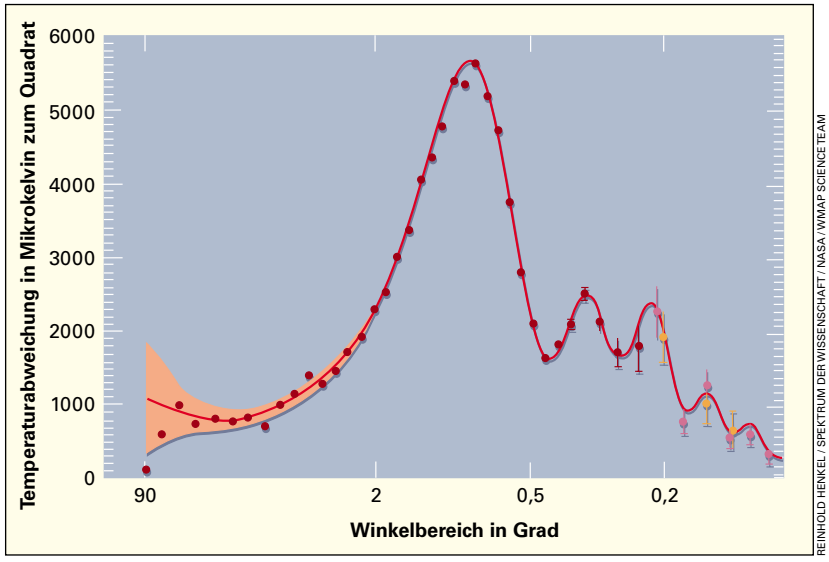
Zwar addiert sich die auf der Größenordnung von Galaxienhaufen geklumpte Materie zu einem Wert von etwa 15 Prozent der kritischen Dichte – allerdings mit so beachtlichen Unsicherheiten, dass aus den Beobachtungen nur ein Wertebereich zwischen zehn Prozent und dreißig Prozent abgeleitet werden kann. Die Messungen des kosmischen Strahlungshintergrunds ergeben 27 Prozent für die Dunkle Materie – eine schöne Übereinstimmung.

Die Physiker wissen noch nicht, woraus die Dunkle Materie besteht, doch es sind Experimente im Gang oder im Aufbau, die wohl in wenigen Jahren ein geeignetes Elementarteilchen finden werden (Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 44). Außerdem bleibt noch die gewaltige Deckungslücke in der kosmischen Energiebilanz von etwa siebzig Prozent der kritischen Dichte.

Die Physiker neigen dazu, dieses Defizit durch die Energie eines speziellen Feldes oder des Vakuums auszugleichen. Sie greifen damit Einsteins – von ihm selbst bald wieder aufgegebenen – Versuch auf, eine »kosmologische Konstante« namens Λ (Lambda) einzuführen. Eine derartige konstante Feldenergie beschleunigt die kosmische Expansion, während die Massen im Kosmos durch ihre Schwerkraft die Expansion abbremsen. Seit in den SNIa-Messergebnissen tatsächlich ein Beschleunigungseffekt identifiziert wurde, wird diese »Dunkle Energie« ernsthaft untersucht (Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 32).

Das Problem der kosmologischen Konstanten führt uns zwanglos auf die wachsende Verbindung von Kosmologie und Elementar- ▷

Die Ungleichmäßigkeit der Hintergrundstrahlung zeigt deutliche Maxima, wenn die Schwankungen in Abhängigkeit von ihrer Winkelgröße aufgetragen werden.



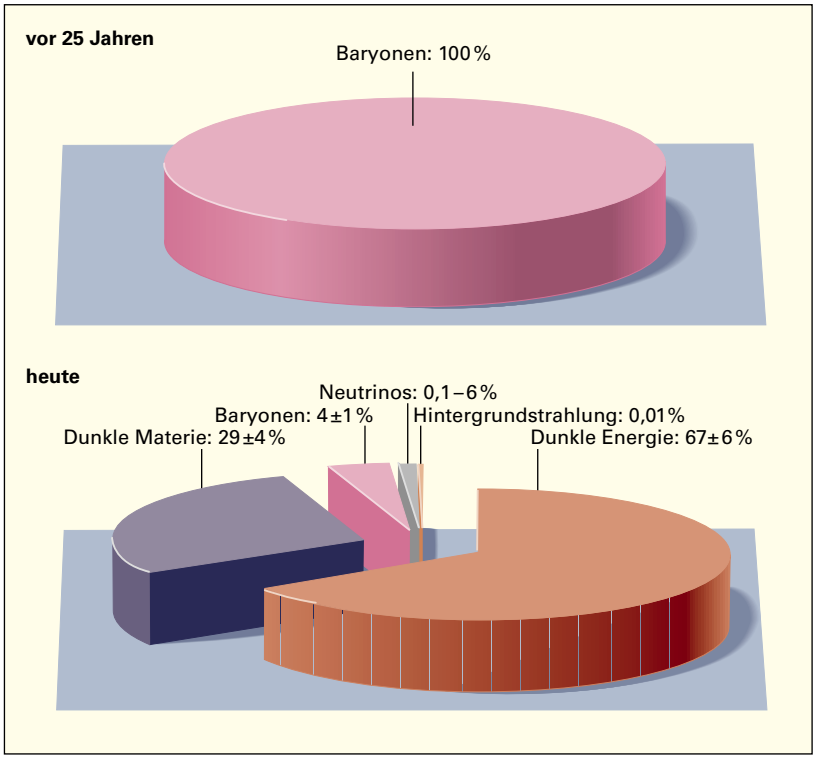
REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / NASA / WMAP SCIENCE TEAM

▷ teilchenphysik. Vor 25 Jahren war davon noch wenig zu hören, doch mit dem »inflationären Universum«, das 1980/81 aufkam, begannen intensive Forschungen in diesem Bereich.

Bei den extrem hohen Dichten und Temperaturen im frühesten Universum müssen nicht nur Quanteneigenschaften der Materie in Betracht gezogen werden, sondern das ganze Universum verhält sich in einem gewissen – noch etwas verschwommenen – Sinn als ein einziges Quantenobjekt. Nur eine künftige Theorie, die Quantenmechanik und Gravitation umfasst, kann weitergehende Aussagen über den Anfang des Universums treffen. Vorläufig werden viele hochinteressante Spekulationen durchgespielt. Sie bilden sozusagen den ausgefransten Rand der Kosmologie, der den harten Kern an gesicherten Tatsachen umspielt (Spektrum der Wissenschaft 12/2002, S. 28).

Ob diese Ansätze den Kosmos besser erklären als das einfache Modell, ergänzt durch ein paar spezielle Anfangsbedingungen, das werden wohl erst die nächsten 25 Jahre zeigen. Jedenfalls hat sich hier ein beliebter Tummelplatz für Theoretiker entwickelt. Bemerkenswert sind etwa Überlegungen, die durch die Stringtheorie – eine mögliche fundamentale Theorie – motiviert sind: Die Raumzeit könnte demnach in Wirklichkeit mehr als vier Dimensionen haben, von denen einige nicht notwendig unmerkbar klein aufgerollt, sondern »groß« sein könnten. In diesen »großen« Extradimensionen wäre allein die Gravitation wirksam, während die üblichen Quantentheorien sich in der normalen vierdimensionalen Raumzeit abspielten (Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 44).

Etwas handfester erscheinen Gedankenspiele, in denen nicht der Urknall selbst betrachtet wird, sondern das hochverdichtete heiße Plasma unmittelbar danach. Im Lichte mutmaßlicher Elementarteilchentheorien, die als »große Vereinigung« oder GUT (Grand Unified Theory) bezeichnet werden, versuchen die Physiker die kosmische Frühphase etwa ab 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall genauer zu beschreiben. Bei diesen Energien sollen die starke, die schwache und die elektromagnetische Kraft zwischen den Elementarteilchen zu einer einzigen Grundkraft verschmelzen. Diese Vorstellung gewann an Gewicht, als es gelang, die Vereinheitlichung von schwacher und elektromagnetischer Kraft, das so genannte elektroschwache Modell, 1983 am Cern, dem europäischen Laboratorium für Teilchenphysik in Genf, experimentell zu bestätigen.



REINHOLD HENKEL / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / GERHARD BÖRNER

Vor 25 Jahren glaubten die Kosmologen an ein Universum mit geringer mittlerer Dichte, das ausschließlich aus »normaler«, also baryonischer Materie bestehen sollte. Heute wissen wir, dass das All größtenteils aus Dunkler Materie und Dunkler Energie besteht, deren Wesen noch gänzlich unbekannt ist.

Quantentheorie und Kosmologie

Ein interessanter Aspekt der großen Vereinigung ist, dass die Kopplungskonstanten, welche die Stärke der zwischen den Teilchen herrschenden Kräfte festlegen, und die Massen der Elementarteilchen nicht länger fest vorgegebene konstante Werte erhalten, sondern von der Energie abhängen. Bei sehr hohen Energien soll die Welt durch eine GUT von hoher Symmetrie beschrieben werden. Die Massen der Elementarteilchen sind in dieser Theorie gleich null und alle Kopplungskonstanten sind gleich groß. Beim Übergang zu weniger symmetrischen Systemen verändern sich die Kopplungskonstanten, und die Elementarteilchen erhalten Massen, die vom Grundzustand – vom »Vakuum« – der neuen Theorie bestimmt werden. Im frühen Universum kamen alle diese »Phasenübergänge« vor. Durch Abkühlung und Expansion wurde der anfangs heiße und symmetrische Kosmos Schritt für Schritt unsymmetrischer, aber auch reicher an Struktur. Schade nur, dass nahe dem Urknall keine Beobachter existierten, die hier ultimative Kenntnisse gewonnen hätten.

Die Idee, die Naturkonstanten seien irgendwie zufällig in der Geschichte des Universums so geworden, wie wir sie vorfinden, hat die philosophische Einstellung der Kosmologen verändert. Könnte es nicht in einem unendlichen Universum, so fragen sie, kausal getrennte Bereiche geben, in denen die Naturkonstanten ganz verschiedene Werte annehmen? Und wie wird unser Teiluniversum ausgewählt? Natürlich so, dass unsere Existenz möglich wird! Diese Neubelebung des »anthropischen Prinzips« hat eine Reihe von An-

hängern gefunden. Aus der Vielzahl derartiger Spekulationen möchte ich speziell das Szenarium des inflationären Universums etwas eingehender schildern.

In den Entwürfen zu einer GUT treten bestimmte Feldgrößen auf, so genannte skalare Higgs-Felder, die durch ihre Wechselwirkungen dafür sorgen, dass aus einer einzigen Urkraft die heute beobachtete Hierarchie der fundamentalen Kräfte entsteht. Obwohl der experimentelle Nachweis derartiger Felder noch aussteht, wird ein Bild nahe gelegt, in dem auch das frühe Universum von skalaren Feldern erfüllt ist. Falls nun die Energiedichte eines skalaren Feldes im Kosmos dominiert und falls die kinetische Energie des Feldes vernachlässigbar ist – das Feld also zeitlich nicht variiert –, so wirkt diese Energiedichte wie eine kosmologische Konstante, die zu einer heftigen Beschleunigung der kosmischen Expansion führt. Durch diese so genannte Inflation verdoppelt sich etwa alle 10^{-35} Sekunden der Abstand zweier Teilchen. Zwischen 10^{-35} Sekunden und einigen 10^{-32} Sekunden wächst durch die inflationäre Expansion der Abstand zweier Teilchen um den Faktor 10^{29}. In diesem kurzen Zeitraum wäre er im Standardmodell nur auf das Hundertfache angewachsen.

Unendlich viele Universen?

Die inflationäre Phase herrschte, solange das Skalarfeld eine von null verschiedene potenzielle Energie hatte – im Fachjargon spricht man vom »falschen« Vakuum. Sie ging zu Ende, sobald das Feld im »richtigen« Vakuum sein Energieminimum erreicht hatte. In der Endphase wurde die Energiedichte des falschen Vakuums freigesetzt; der inflationierte Bereich füllte sich mit einem Gas heißer Teilchen und Strahlung. Von diesem Zeitpunkt an entwickelte sich der Kosmos wie im Urknallmodell. Die gewaltige Aufblähung bewirkt, dass die Krümmung fast null wird, der Kosmos also sehr genau die kritische Energiedichte aufweist.

Das ist ein schönes Ergebnis des Inflationsmodells. Besonders wichtig ist aber die Vorhersage eines Spektrums von Dichtefluktuationen, das aus Quantenfluktuationen des Skalarfelds berechnet werden kann – in Übereinstimmung mit den gemessenen Fluktuationen des Strahlungshintergrunds. Beachtenswert scheint mir auch, dass im Inflationsmodell nicht die ganze Raumzeit, sondern nur ein winziger Anfangsbereich der Keim ist, aus dem unser Kosmos entsteht. Die gesamte Struktur könnte aus vielen kausal getrennten Bereichen bestehen, teils mit, teils ohne Inflation, mit ganz verschiedenen Werten der Naturkonstanten. Auf diese Weise würden unendlich viele Universen entstehen, in einem kontinuierlichen Prozess, ohne Anfang und Ende. Solche Bilder mögen sehr attraktiv erscheinen, es ist aber schwierig, sie quantitativ physikalisch zu beschreiben. Wir werden sehen, was in 25 Jahren davon geblieben ist (siehe »Paralleluniversen« von Max Tegmark, Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34).

Das größte Rätsel: die Dunkle Energie

Durch die Vermessung der Hintergrundstrahlung ist aus Einsteins »größter Eselei« – so bezeichnete er selbst die Einführung der kosmologischen Konstanten – eine respektable physikalische Größe geworden, die gegenwärtig und in Zukunft die Expansion des Universums bestimmt. Die Quantentheorie könnte eine Deutung dieser Größe als Energie des Vakuums liefern. Der leere Raum ist, quantentheoretisch betrachtet, ein komplexes Gebilde, durchzogen von einem Geflecht aus fluktuierenden Feldern, die zwar nicht direkt beobachtet werden können, aber zur Energie des Grundzustands beitragen. Die Theoretiker können einige dieser Beiträge ganz gut abschätzen, erhalten jedoch einen Wert, der um 108 Größenordnungen den Wert übertrifft, den die astronomischen Beobachtungen nahe legen. Andere Beiträge, die noch nicht berechnet werden können, würden vielleicht diesen Wert ausbalancieren, aber dieser Ausgleich müsste dann mit unvorstellbarer Präzision bis auf 108 Stellen nach dem Komma erfolgen.

Es ist ein ungelöstes Rätsel der Quantenphysik, wie das zugehen könnte. Somit bleiben uns zunächst nur tastende Versuche, unsere Unkenntnis mathematisch zu präzisieren, indem wir die potenzielle Energie eines skalaren Feldes mit passenden Eigenschaften beschreiben. Mittlerweile hat sich das unbekannte Skalarfeld als beliebtes Lasttier der Kosmologen etabliert. Auch der schöne Name »Quintessenz« ist für diese kosmische Energiedichte erfunden worden. Er geht auf die Naturphilosophie des Aristoteles zurück, der damit das fünfte Element, den Äther, bezeichnete.

Tatsächlich bleibt es ein Rätsel, warum diese Dunkle Energie überhaupt vorhanden ist und warum sie gerade jetzt die kosmische Expansion bestimmt. Bleibt die Dunkle Energie konstant, so wird die kosmische Expansion sich immer weiter beschleunigen und nie aufhören. Die Verknüpfung mit dem Konzept der Feldenergie bietet aber auch die interessante Möglichkeit, dass in der Zukunft durch das zeitliche Verhalten des Feldes überraschende Wendungen in der kosmischen Entwicklung auftreten. Astronomische Beobachtungen stoßen hier auf ein tiefes Problem der Elementarteilchentheorie. Schöner könnte die Verbindung von Quantenphysik und Kosmologie gar nicht sein. ◁

Gerhard Börner erforscht am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching Dunkle Materie und großräumige kosmische Strukturen. Er ist Professor an der Universität München, wo er unter Werner Heisenberg und Hans-Peter Dürr in Teilchenphysik promovierte.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Kosmologie. Von Gerhard Börner. Fischer, Frankfurt 2002.

Einführung in die Kosmologie. Von Hubert Goenner. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1994.

The Early Universe. Facts and Fiction. Von Gerhard Börner. Vierte Auflage. Springer Verlag, Berlin 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Krank aus der Retorte

Entwicklungsstörungen und Fehlbildungen treten nach einer Befruchtung »im Reagenzglas« öfter auf als bei natürlich gezeugten Kindern. Mediziner fordern für neuere Verfahren eine kritischere Überwachung.

Von Martina Lenzen-Schulte

Die ersten Meldungen, dass Kinder außerhalb des Mutterleibs gezeugt worden seien, riefen Ende der 1970er Jahre bei vielen Menschen Entsetzen und bei Medizinern Vorbehalte hervor. Heute sorgen Geburten von »Retortenbabys« längst nicht mehr für Schlagzeilen. Die Zeugung im Reagenzglas – genau genommen ist es ein flaches Glasgefäß – gilt als bewährte medizinische Maßnahme, um jenen Paaren ihren Kinderwunsch zu erfüllen, die keine oder nur verminderte Chancen haben, dies auf normalem Wege zu verwirklichen.

Seit vor 25 Jahren, im Sommer 1978, Louise Brown als erstes Retortenbaby zur Welt kam, wurden weltweit über eine Million »in vitro« (in Laborkultur) gezeugter Kinder geboren, in Deutschland erstmals 1982 an der Universitätsfrauenklinik in Erlangen. Jährlich erfolgen inzwischen mehr als 400 000 Behandlungen, bei denen Mediziner der Mutter Eizellen entnehmen, sie mit dem Samen des Vaters befruchten und danach der Frau einsetzen. Allein in Deutschland verdanken zwei bis drei Prozent, rund jedes vierzigste aller Neugeborenen ihre Existenz einer künstlichen Befruchtung. 2001 wurden in Deutschland rund 10 000 Retortenkinder geboren.

Jahrelang gab es keine wirklich verlässlichen Erkenntnisse darüber, wie gesund oder krank die Kinder tatsächlich sind. Erste Untersuchungen hierzu fielen günstig aus. Sie bestätigten die Euphorie und das Glück vieler Eltern. In jüngster Zeit erheben sich indessen zunehmend warnende Stimmen von Kinderärzten und Epidemiologen, aber auch von Reproduktionsmedizinern selbst. Offenbar hatten sie die gesundheitlichen Risiken für diese Kinder bislang unterschätzt.

Vier neuere Studien haben die Fehlbildungsrate untersucht. Einige dieser Arbeiten unterscheiden zudem zwischen Kindern von einer herkömmlichen In-vitro-Fertilisation (IVF) – bei der die aufbereiteten Spermien nur zur Eizelle gegeben werden – und Kindern von einer Zeugung, bei der ein einzelnes Spermium direkt in die Eizelle eingespritzt wurde, eine so genannte intracytoplasmatische Spermieninjektion (ICSI).

Wissenschaftler des finnischen Nationalen Forschungs- und Entwicklungszentrums (Stakes) in Helsinki ermittelten ein 1,4fach höheres Risiko für angeborene Fehlbildungen beim gesamten Kollektiv der erfassten Retortenkinder. Mitarbeiter der Universität von Westaustralien in Perth fanden ein doppelt so hohes Fehlbildungsrisiko sowohl bei durch ICSI als auch mit herkömmlichen IVF-Verfahren gezeugten Kindern. Eine neuere Untersuchung aus Deutschland hat aus insgesamt 95 Fertilitätszentren ein 1,25-mal höheres Fehlbildungsrisiko für die durch ICSI gezeugten Kinder ermittelt. Die Auswertungen des Mainzer Geburtenregisters, in dem alle Fehlbildungen im Raum Mainz erfasst werden, ergaben für ICSI-Kinder sogar ein dreifach höheres Risiko. Die Mainzer fanden in ihrem Kollektiv bei natürlich gezeugten Kindern gut fünf Prozent Fehlbildungen, bei jenen nach ICSI jedoch 16 Prozent.

Zu den Fehlbildungen zählten etwa Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten, ein offener Wirbelkanal, ein Wasserkopf, Defekte des Herzens, der Nieren, der Bauchspeicheldrüse und der Geschlechtsorgane. Fisteln zwischen Scheide und Darm kamen ebenso vor wie ein komplett verschlossener After. Auch Chromosomenfehlverteilungen wie beim Down-Syndrom (früher Mongolismus genannt) traten häufiger auf. Die manchmal stark voneinander abweichenden Zahlen können die Wissenschaftler derzeit nicht eindeutig erklären. Zum Teil machen sie die Unterschiede bei der Datenerfassung dafür verantwortlich. Andererseits überlegen sie auch, ob unterschiedliche Eigenschaften der Eltern einen Einfluss hatten.

Außer den genannten Defekten treten vermutlich sehr seltene, genetisch bedingte Krankheiten im Zusammenhang mit künstlicher Befruchtung häufiger auf. Amerikanische Genetiker berechneten, dass das Risiko für ein Beckwith-

IN KÜRZE

- **»Retortenkinder«** leiden auffallend oft an Geburtsschäden, Entwicklungsstörungen und Erbdefekten. Auch Krebsleiden scheinen häufiger vorzukommen.
- Zum einen gehen nach einer Befruchtung im Reagenzglas (**IVF: In-vitro-Fertilisation**) die vielen Mehrlingsschwangerschaften mit einem sehr hohen Risiko für die Kinder einher. Zum anderen stehen manche der Manipulationen, aber auch die unnatürlichen Bedingungen im Kulturgefäß im Verdacht, die Entwicklung des Kindes zu gefährden.
- Im Zusammenhang mit seltenen Erkrankungen erhob sich insbesondere zur gezielten Injektion eines Spermiums in die Eizelle (**ICSI: intracytoplasmatische Spermieninjektion**) in letzter Zeit warnende Kritik.

RYSZARD HOROWITZ / CORBIS

Die künstliche Zeugung im Labor ist aktuellen Studien zufolge für die Kinder nicht völlig unbedenklich. Vor allem die neueren Zeugungsmethoden scheinen Gesundheitsrisiken zu bergen.

Wiedemann-Syndrom nach einer künstlichen Zeugung um das Sechsfache erhöht ist. Laut einer englischen Studie war es viermal häufiger. Die Kinder werden mit ausgeprägtem Übergewicht geboren, auch die inneren Organe sind zu groß. Charakteristisch ist die zu große Zunge, die über die Lippen hinausragt und manchmal operativ verkleinert werden muss, damit die Kinder sprechen lernen können. Diese kleinen Patienten sind auch für einen Nierenkrebs des Kindesalters, den Wilms-Tumor, besonders anfällig. Eine andere äußerst seltene Erkrankung, das Angelmann-Syndrom, geht mit schwerer geistiger Behinderung einher. Die Kinder bewegen sich ruckartig, machen weit ausfahrende Bewegungen und können nicht sprechen lernen. Bernhard Horstehmke vom Institut für Humangenetik der Universität Essen hat zusammen mit Forschern aus den USA einen mutmaßlichen Zusammenhang zwischen einer Spermieninjektion und dieser Erkrankung aufgezeigt.

Risiko für seltene Krankheiten

Auch über ein insgesamt vermehrtes Vorkommen von Krebsleiden bei Retortenkindern wird diskutiert. Vor zwei Jahren berichteten Ärzte von der Hadassah-Universitätsklinik in Israel, dass schwere Augenleiden vermehrt bei Kleinkindern nach künstlicher Befruchtung entdeckt wurden, darunter auch Retinoblastome – bösartige Tumoren der Netzhaut, die vor allem in den ersten Lebensjahren auftreten. Retinoblastome sind kürzlich wieder aufgefallen: Annette Moll von der Universität Amsterdam fand heraus, dass dieser Krebs bei Retortenkindern unverhältnismäßig oft vorkommt.

Wenngleich derartige Defekte für die Kinder und deren Familien ein schweres Schicksal bedeuten, handelt es sich um seltene Ereignisse. Die Mehrzahl der Retortenkinder ist hiervon nicht betroffen. Da zurzeit jedoch niemand sicher sagen kann, ob diese erhöhten Risiken gewissermaßen die Spitze eines Eisbergs darstellen und weitere Defekte vielleicht erst in späteren Lebensjahren zu Tage treten, ▷

▷ ist die Erforschung ihrer Ursachen zwingend geboten. Manche Zusammenhänge lassen sich lediglich vermuten, für andere gibt es bereits deutliche Hinweise.

Im Wesentlichen dürften zwei Risikokomplexe eine Rolle spielen. Zum einen sind die genetischen Voraussetzungen der Eltern meist nicht günstig. Zum anderen könnten die Manipulationen oder auch die von den natürlichen Vorgängen abweichenden Bedingungen während der künstlichen Befruchtung Entwicklungsstörungen erst verursachen.

Wie es aussieht, geben Eltern gerade bei einer künstlichen Befruchtung eher als sonst genetische Defekte an ihre Kinder weiter. In den Samenproben der Männer, die sich mit Hilfe der Spermieninjektion den Wunsch nach einem leiblichen Kind erfüllen wollen, finden sich in Extremfällen bis zu siebzig Prozent Fehlverteilungen der Chromosomen. Häufig sind hiervon die Geschlechtschromosomen betroffen. Dann enthalten die Körperzellen des Mannes beispielsweise neben einem Y- zwei X-Chromosomen statt einem einzigen, was man als Klinefelter-Syndrom bezeichnet. Es kann sich in einem eher femininen Körperbau, weiblich geformten Brüsten, einem auffallend kleinen Penis und geringer Körperbehaarung zeigen. Mitunter geht der Chromosomenschaden auch mit geistigen Entwicklungsstörungen einher. In Deutschland leben schätzungsweise 80 000 Klinefelter-Patienten, aber lediglich jeder sechzehnte ist in Behandlung. Nur selten wissen die Betroffenen von ihrer Veranlagung. Im Kollektiv derer, die wegen Unfruchtbarkeit eine künstliche Maßnahme wünschen, häufen sich solche und andere genetische Erkrankungen, die mit eingeschränkter Zeugungsfähigkeit einhergehen. Schon deswegen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich nach Fertilitätsbehandlungen bei den Kindern genetische Defekte häufen.

Spermieninjektion unter Verdacht

Wie stark sich das Risiko erhöht, einen genetischen Schaden weiterzugeben, hängt auch vom gewählten Verfahren ab. Bei einer natürlichen Zeugung sind mehr als eine Million Spermien beteiligt. Bei einer normalen In-vitro-Befruchtung konkurrieren 50 000 bis 100 000 Spermien um die Eizelle. Bei einer Spermieninjektion wählt das Laborpersonal ein einziges Spermium aus, welches mit einer sehr feinen Pipette in die Eizelle hineingespritzt wird. Zwar kann man abnormal aussehende oder schlecht schwimmende Spermien meiden. Allerdings lässt sich im Einzelfall nicht vom Äußeren auf genetische Schäden schließen. Da die Samenproben häufiger als sonst Spermien mit genetischen Defekten enthalten, werden solche zwangsläufig öfter ausgewählt. Die von der Kassenärztlichen Bundesvereinigung herausgegebenen Richtlinien über künstliche Befruchtung verlangen daher ausdrücklich eine Beratung der Paare auch über die höheren genetischen Risiken der Spermieninjektion.

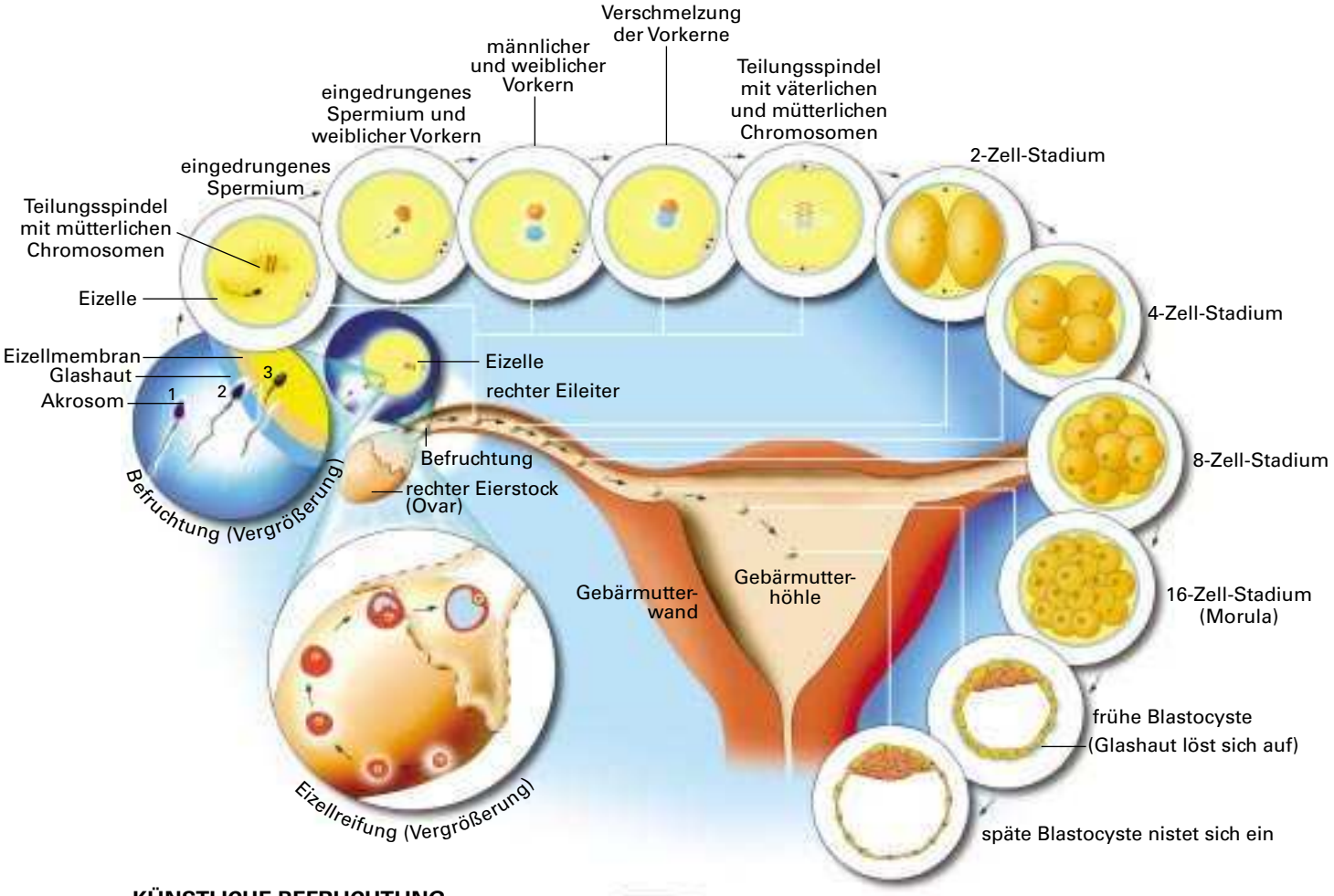
Die Manipulationen während einer Spermieninjektion werden ebenfalls als mögliche Ursache für Defekte angeführt. Die enzymhaltige Spitze eines Spermiums, das Akrosom, ist ein chemischer Bohrer, der die feste und schützende Eihülle öffnet. Nur Kern und Schwanz des Spermiums kommen bei einer natürlichen Befruchtung ins Innere der Eizelle. Wird ein Spermium injiziert, gelangt auch die enzymhaltige Kappe mit hinein. Es gibt Hinweise, dass sich die Befruchtung verzögert, solange das Akrosom nicht abgebaut ist.

Überdies befürchten Reproduktionsmediziner, bei einer Spermieninjektion den zarten so genannten Spindelapparat in der Eizelle zu zerreißen. Sie würden damit die letzten Schritte der Reifeteilung stören – des Prozesses, durch den die Eizelle in zwei Zellteilungen statt eines doppelten einen einfachen Chromosomensatz erhält. Vor der Befruchtung hängen die Erbstränge für die zweite Teilung zwar schon sortiert an der Spindel, doch gänzlich voneinander getrennt werden sie erst, wenn eine Samenzelle eingedrungen ist. Der Spindelapparat ist unter herkömmlichen Mikroskopen nicht zu sehen und kann beim Injizieren beschädigt werden oder zerreißen. Es gibt grobe Anhaltspunkte, um dies zu vermeiden – vollkommen zuverlässig sind sie indes nicht. Eine bessere Orientie- ▷

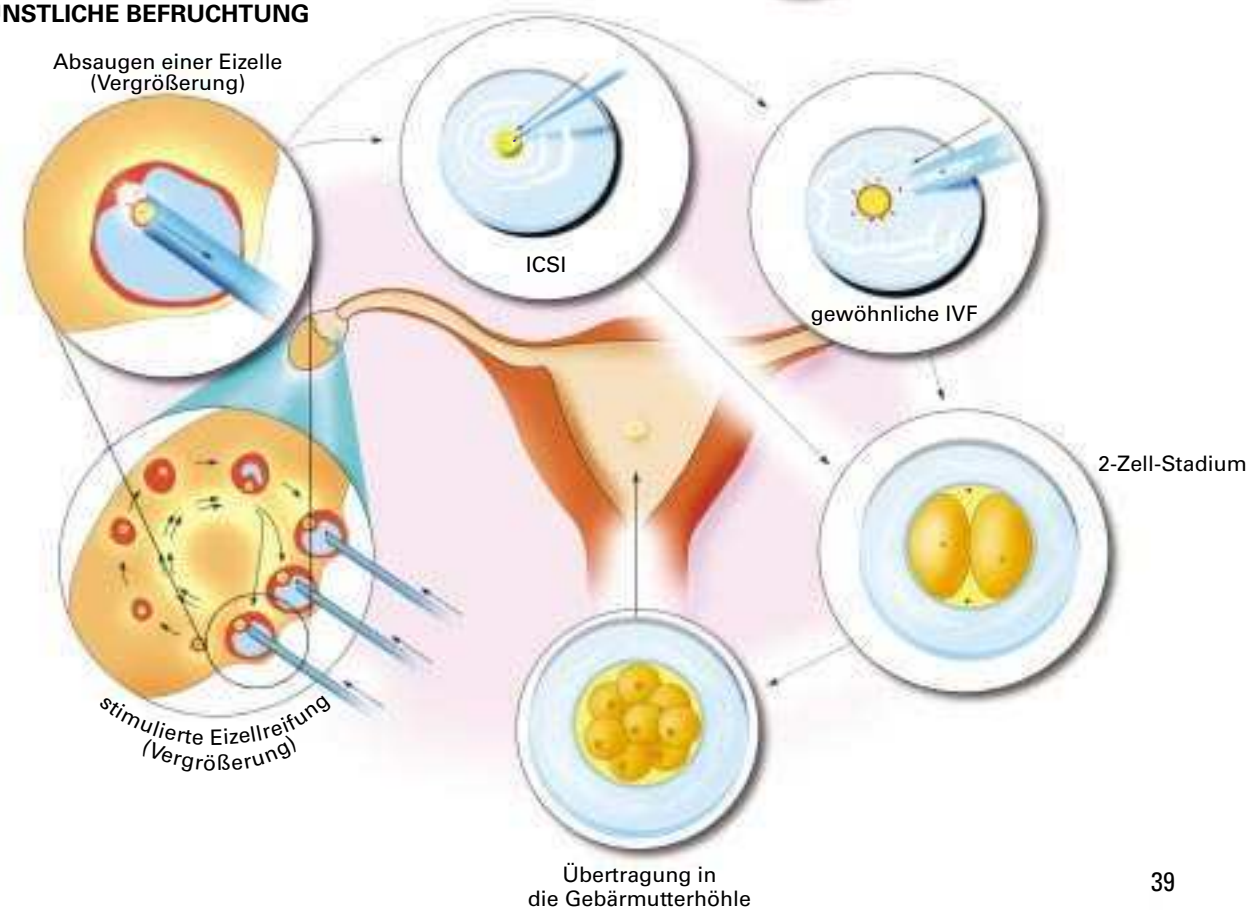
LINKS: PASCAL GOETGHELUCK / SCIENCE PHOTO LIBRARY; RECHTS: ADRIAN ARBIB / CORBIS

Im Jahr 2003 wurde Louise Brown, das erste Retortenkind, 25 Jahre alt. Das rechte Bild zeigt sie vor fünf Jahren mit ihren Eltern, das obere mit dem Forscher Pierre Soupart. Er meinte damals, in gut zehn Jahren würden Kinder wie sie keine Schlagzeilen mehr machen.

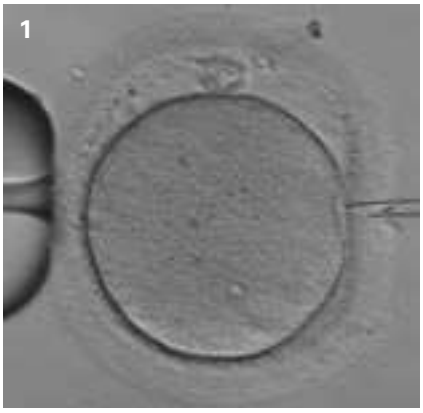
NATÜRLICHE BEFRUCHTUNG

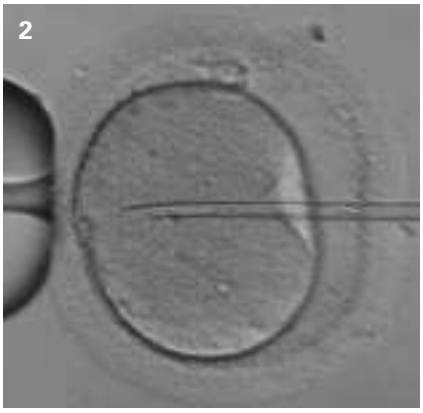


KÜNSTLICHE BEFRUCHTUNG



MARTINA LENZEN-SCHULTE / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT





Während der intracytoplasmatischen Spermieninjektion (ICSI) hält eine Saugpipette (jeweils links im Bild) die Eizelle fest. Durch eine feine Kanüle wird ein einzelnes Spermium eingespritzt. Oben über der Eizelle ist das erste Polkörperchen zu sehen, das bei der Halbierung ihres Chromosomensatzes entsteht.

▷ rung ermöglichen spezielle Polarisationsmikroskope, die den Spindelapparat sichtbar machen.

Die erwähnten Fehlbildungen traten jedoch nicht nur nach Spermieninjektionen auf, sondern auch nach einfacher in-vitro-Fertilisation. Deshalb gilt es, die Vorgänge bei jedweder künstlichen Befruchtung genauer zu erfassen.

Die Bedingungen im Glasgefäß, die in vielem von den natürlichen Verhältnissen abweichen, könnten ebenfalls für beobachtete Defekte verantwortlich sein. Viele Hinweise hierzu kommen von Veterinärmedizinern, die solche Unterschiede an Tieren erforschen. Während die befruchtete Eizelle durch den Eileiter in die Gebärmutter wandert, empfängt sie vielfältige Hilfen und Signale. So geben Zellen, welche die Innenwand der Eileiter auskleiden, Zucker-Protein-Moleküle ab. Die Glykoproteine vergrößern die Haftung der embryonalen Zellen untereinander und machen aus einem lockeren Zellverband einen verdichteten Klumpen. Dieser Prozess, Kompaktion genannt, ist ein äußerst wichtiger Schritt in der Embryonalentwicklung. Offenbar entgiften die Eileiterzellen auch die Umgebung und schützen vor schädlichen Sauerstoffradikalen. Versuche, derartige Hilfsdienste bei menschlichen Embryonen etwa von Affen- oder Rinderzellen übernehmen zu lassen, hatten keinen durchschlagenden Erfolg.

Für problematisch erachten die Veterinärmediziner inzwischen die Zugabe von Blutserum. Die darin enthaltenen Proteine, vor allem das Albumin, sollen eigentlich das Wachstum des Embryos unterstützen. Inhaltsstoffe von Seren bringen aber vermutlich das »Imprinting« durcheinander, jene Prägungen mancher Gene, die nicht in den Erbsequenzen festgeschrieben sind, sondern während der Embryonalentwicklung durch außerhalb des Genoms liegende Faktoren stattfinden. Durch genetische Prägung lassen sich bestimmte mütterliche Gene an- und dafür väterliche ausschalten – oder umgekehrt. Die so veränderbaren Gene bestimmen die Embryonalentwicklung und beeinflussen Wachstumsvorgänge.

Ein Syndrom, das bei künstlich gezeugten Tieren dem Beckwith-Wiedemann-Syndrom ausgesprochen ähnelt, konnte auf eine Fehlschaltung von Genen zurückgeführt werden, die in den ersten Tagen der Embryonalentwicklung eine solche Prägung erfahren. Wegen der engen Verbindung von unkontrolliertem Wachstum und Tumoren kämen derartige Prägungsdefekte auch als Ursache von Krebserkrankungen in Frage. Zudem werden auf falsches Imprinting nicht nur überschießendes Wachstum und Übergewicht, sondern auch verzögertes Wachstum und Untergewicht zurückgeführt.

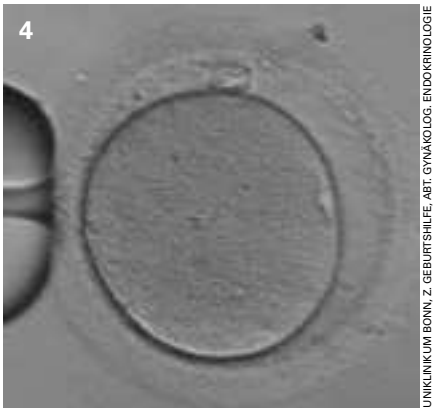
AG. FOCUS / SPL / DR. TONY BRAIN

Manche defekten Spermien sind äußerlich erkennbar. Hier trägt eines einen doppelten Kopf. Doch viele genetische Schäden bleiben unter dem Mikroskop unerkannt.

Genetische Fehlprägungen

Eine der in diesem Zusammenhang immer wieder angeführten Studien ist die von Laura Schieve von den Gesundheitszentren in Atlanta (US-Bundesstaat Georgia). Danach sind künstlich gezeugte Kinder 2,6-mal häufiger als natürlich gezeugte untergewichtig, haben ein Geburtsgewicht von unter 2500 Gramm – selbst wenn sie reif, also zum regulären Termin geboren sind. Einen allerersten Hinweis auf eine mögliche Ursache kommt aus einem deutschen Labor. Die Arbeitsgruppe um Annette Queißer-Luft der Universitätskinderklinik Mainz entdeckte bei untergewichtigen, mittels Spermieninjektion gezeugten Kindern einen Prägungsfehler auf Chromosom 11. Als Beweis für einen Zusammenhang darf dies zwar noch nicht gelten. Allerdings liegen auf dem betreffenden Chromosomenabschnitt wichtige wachstumssteuernde Gene. In dieser Region wurde gleichfalls der Prägungsdefekt beim Angelmann-Syndrom dingfest gemacht.

Auch das Einfrieren von Embryonen, beziehungsweise deren Vorstufen, kann Schäden verursachen. Die Überlebensrate nach dem Auftauen ist schlechter als die frischer Embryonen. Die Glashaut, die schützende Eihülle, kann beim Einfrieren einreißen. Damit sich im Innern der Eizelle keine tödlichen Eiskristalle bilden, werden zum Herabsetzen des Gefrierpunkts Frostschutzmittel – alkoholische



UNIKLINIK UM BONN, Z. GEBURTSHILFE, ABT. GYNÄKOLOG. ENDOKRINOLOGIE

Zellgifte – eingesetzt. Ob neue, ultraschnelle Gefrierverfahren langfristig weniger Schäden bewirken, ist noch nicht entschieden.

Embryonen dürfen in Deutschland nicht aufgehoben, demnach auch nicht eingefroren werden. Erlaubt ist nur, so viele heranzuzüchten, wie auch übertragen werden sollen. Bevor die Kerne von Ei- und Samenzelle verschmolzen sind, handelt es sich per Definition noch nicht um einen Embryo. Diese als Vorkernstadien bezeichneten »Noch-nicht-Embryonen« darf man auch in Deutschland einfrieren, um sie dann später zu verpflanzen, wenn Zeugungsversuche mit frischen Embryonen fehlgeschlagen sind. In deutschen Fertilitätskliniken lagern einige zehntausend Zellen im Vorkernstadium. Im Jahr 2000 erfolgten in Deutschland rund 9500 Embryotransfers nach Wiederauftauen zuvor eingefrorener Keime. Die Schwangerschaftsraten hiernach sind deutlich niedriger.

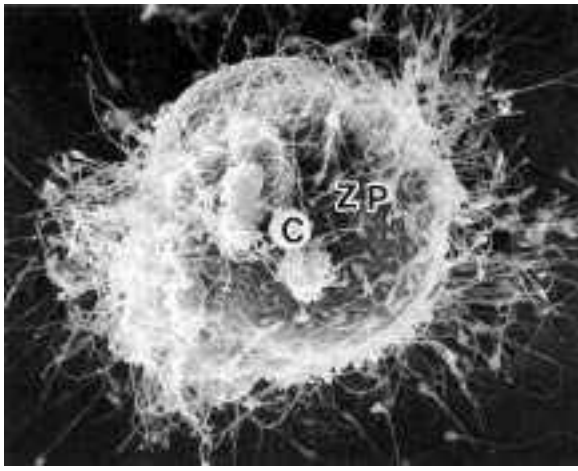
Die letztgenannten Aspekte werden erst seit neuestem als Risikofaktoren diskutiert. Längst bekannt sind jedoch die Gefahren durch die viel zahlreicheren Mehrlingsgeburten nach künstlicher Befruchtung. Der weibliche Organismus ist nicht darauf ausgerichtet, Mehrlinge auszutragen. Nach einer natürlichen Zeugung wachsen nur bei 1,19 Prozent der Schwangerschaften Zwillinge heran. Die Maßnahmen zur künstlichen Befruchtung haben diese Rate auf das Zwanzigfache erhöht. Höhergradige Mehrlinge traten danach sogar mehrhundertfach öfter auf. Weltweit – auch in Deutschland – sind bis zu vierzig Prozent jener Neugeborenen, die mit medizinischer Hilfe gezeugt werden, Mehrlinge, meist Zwillinge.

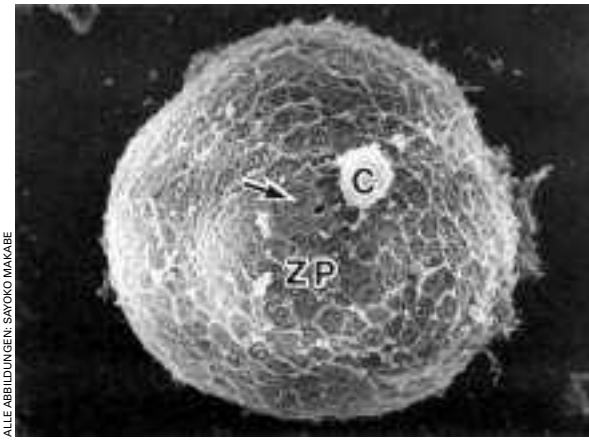
Die oft viel zu frühe Geburt dieser Kinder geht häufig mit Defekten einher, die eine Hypothek für das ganze Leben darstellen. Eine in diesem Oktober veröffentlichte Bestandsaufnahme der Entwicklung von Kindern mit einem Geburtsgewicht unter tausend Gramm fasst Ergebnisse aus Kanada, den USA, den Niederlanden und Bayern zusammen. Mehr als die Hälfte dieser Kinder hatte erhebliche Schulprobleme. Im Einzelnen ließen sich bei ihnen vor allem mehr Aufmerksamkeitsdefizite erkennen. Auch schizoide Auffälligkeiten wie Halluzinationen und Tagträume sowie Schwierigkeiten im Umgang mit Gleichaltrigen traten mehr als sonst auf.

In einer Untersuchung aus den USA wies die Hälfte der extrem früh geborenen Kinder mindestens einen schweren neurologischen Defekt auf, wie eine Lähmung, Blindheit oder Taubheit. Drillinge leiden 47-mal häufiger an zerebralen Lähmungen als Kinder aus Einzelschwangerschaften. Einer schwedischen Untersuchung zufolge war das Risiko für spastische oder andere zerebral verursachte Lähmungen für Retortenkinder 2,8-mal höher als sonst, für die Mehrlinge sogar 3,7-mal so hoch. Unlängst haben Forscher aus Israel bei zu früh geborenen und in vitro gezeugten Kindern unverhältnismäßig häufig schwere Hirnblutungen gefunden. Sie vermuten, dass künstliche Befruchtung einen eigenen Risikofaktor für diese schwere Komplikation bei Frühgeborenen darstellen könnte.

Inzwischen ist unumstritten, dass der Großteil der gesundheitlichen Schäden bei Retortenkindern auf die Mehrlingsschwangerschaften zurückgeht. In England erhoben sich bereits Stimmen, die Reproduktionskliniken an den immensen Krankheitskosten für diese Kinder zu beteiligen. Je mehr Embryonen man in den Mutterleib zurückverpflanzt, desto größer die Chance auf eine Schwangerschaft. Dieses eherne Gesetz der Reproduktionsmedizin hat vor allem in den USA lange Zeit dazu verführt, oft weit mehr als drei Embryonen zu übertragen. Seit Mediziner erkannten, wie viele Komplikationen bereits Drillingen drohen, wurden die »überzähligen« Embryonen abgetötet. Dieser so genannte Fetozid – in den USA eine durchaus übliche Maßnahme zur Reduktion von Mehrlingen – birgt jedoch Gefahren für die verbleibenden Feten. Je nach Anzahl der getöteten Kinder endet danach jede zwölfte bis sechste Schwangerschaft. Inzwischen weiß man längst, dass die Schwangerschaftsraten bei sehr vielen eingesetzten Embryonen ▷

Elektronenmikroskopische Aufnahmen menschlicher Embryonen im Zwei-, Drei- und Vierzellstadium nach künstlicher Befruchtung. Die Glashaut (ZP) ist beim oberen Bild entfernt. Auf der linken Zelle sitzt oben ein Polkörperchen. Der Pfeil weist auf einen frei liegenden Teil der Zelle. Der Embryo im mittleren Bild ist noch von Spermien, einigen Hilfszellen (C) und der Glashaut umgeben. Im unteren Bild scheint die Einstichstelle von der Spermieninjektion durch die Glashaut noch erkennbar (Pfeil). Sie schließt sich später.





ALLE ABBILDUNGEN: SAYOKO MAKABE

INTERVIEW

»Die Mehrlinge sind das größte Problem«

Klaus Diedrich nimmt Stellung zur deutschen Reproduktionsmedizin und den Gefahren, die aus der künstlichen Befruchtung für das Kind erwachsen.

KLAUS DIETRICH

Professor Dr. Klaus Diedrich ist Direktor der Universitäts-Frauenklinik in Lübeck und Präsident der Deutschen Gesellschaft für Gynäkologie und Geburtshilfe. Er beschäftigt sich seit Jahren mit den Risiken der künstlichen Befruchtung.

Spektrum der Wissenschaft: Neue Studien weisen darauf hin, dass künstlich gezeugte Kinder mehr Fehlbildungen haben als andere Kinder. Sind die Fortpflanzungsmediziner von diesen Befunden beunruhigt oder ist das falscher Alarm?

Prof. Dr. Klaus Diedrich: Grundsätzlich muss man solche Studien immer ernst nehmen. Ich möchte hier aber zwischen IVF und ICSI unterscheiden, also zwischen herkömmlicher In-vitro-Fertilisation und der Injektion von Spermien in Eizellen. Es gibt durchaus Studien, die eine etwas erhöhte Fehlbildungsrate nach IVF anzeigen. Doch das Deutsche IVF-Register, in dem alle künstlichen Befruchtungen hier zu Lande registriert werden, ergibt solche Hinweise nicht. Im Jahre 2001 zum Beispiel gab es 75000 IVF-Behandlungen in Deutschland; die Schwangerschaftsrate lag bei 25 Prozent, die Fehlbildungsrate bei den geborenen Kindern betrug 2,4 Prozent. Das ist vergleichbar mit normalen Schwangerschaften, wo die Fehlbildungsrate zwischen zwei und fünf Prozent liegt – abhängig vom Alter der Frau.

Spektrum: Und gibt es auch Zahlen zu ICSI?

Diedrich: Die Fehlbildungsrate bei der ICSI liegt, ausgehend vom Deutschen IVF-Register, etwa bei 3,4 Prozent. In diesem Zusammenhang muss ich auch die deutsche ICSI-Studie erwähnen, die unlängst erschien. Hier wurden 3000 Kinder, die nach ICSI geboren wurden, mit 8000 normal gezeugten Kindern verglichen. In dieser Studie betrug die Fehlbildungsrate bei den ICSI-Kindern 8,3 Prozent, bei den Kindern aus dem »Normalkollektiv« hingegen 6,8 Prozent. Die Fehlbildungsrate scheint bei der ICSI also tatsächlich etwas erhöht zu sein. Auch ausländische Studien deuten darauf hin.

Wenn Fehlbildungen mit größerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind, dann raten wir von einer IVF-Behandlung ab.

Spektrum: Welche Konsequenzen ziehen Sie daraus?

Diedrich: Wir weisen die betroffenen Paare auf diese Ergebnisse hin. Um es noch einmal etwas genauer zu quantifizieren: Bei einer normalen Schwangerschaft hat etwa jedes 15. Kind eine Fehlbildung, nach ICSI ist es etwa jedes 13. Kind.

Spektrum: Sind diese Zahlen schon von den Mehrlingsschwangerschaften bereinigt? Letztere treten bei künstlichen Befruchtungen überdurchschnittlich oft auf, und die Mehrlinge werden in der Regel zu früh, also unreif, geboren.

Diedrich: Diese Zahlen sind nicht von den Mehrlingsschwangerschaften bereinigt. Das ist auch nicht erforderlich: Die Ergebnisse bleiben gleich, wenn man die Mehrlingsschwangerschaften herausrechnet. Wir konnten in der deutschen ICSI-Studie feststellen, dass Mehrlinge kein höheres Fehlbildungsrisiko haben. Natürlich ist bei ihnen die Frühgeburtsgefahr erhöht, aber das darf man nicht in Verbindung mit Fehlbildungen bringen. Übrigens halte ich die Frühgeburten für das entscheidende Problem der Reproduktionsmedizin.

Spektrum: Die Chancen einer Schwangerschaft nach einem Embryotransfer sind relativ klein. Um sie zu erhöhen, werden mehrere Embryonen eingepflanzt, wodurch das Mehrlingsrisiko zunimmt. Welche Hindernisse bestehen in Deutschland, nur einen einzigen ausgewählten Embryo zu übertragen?

Diedrich: Nach dem deutschen Embryonenschutzgesetz dürfen wir bis zu drei Eizellen befruchten; jede befruchtete Eizelle, also jeder Embryo, muss dann auch in demselben Zyklus an die Mutter zurückgegeben werden. Wir dürfen keinen Embryo auswählen; jeder Embryo muss – egal wie er unter dem Mikroskop aussieht – transferiert werden.

Spektrum: Wären Sie glücklicher damit, wenn Sie einen Embryo auswählen dürften?

Diedrich: Ja. Studien aus Belgien, Finnland und Schweden haben gezeigt, dass die Einpflanzungschance eines ausgewählten Embryos, der sich morphologisch gut entwickelt hat, bei 35 bis 40 Prozent liegt. Das heißt, man kann mit einem einzigen ausgewählten Embryo teilweise bessere Schwangerschaftsraten erzielen als mit drei nicht ausgewählten. Gleichzeitig würde das Mehrlingsrisiko vermindert.

Spektrum: Was würde in einem solchen Fall aus den anderen, nicht ausgewählten Embryonen?

Diedrich: Man könnte sie einfrieren und später, wenn die Patientin nicht schwanger wird oder ein zweites Kind haben will, wieder einpflanzen. Doch wenn sie die Embryonen nicht haben will? Dann muss es akzeptabel sein, den Embryo aufzutauen und absterben zu lassen. Das ergibt natürlich sofort Konflikte mit dem Embryonenschutzgesetz. Deshalb meine ich, dass man über eine Änderung dieses Gesetzes nachdenken sollte, wenn man – im Sinne der Patientin – die Schwangerschaftsrate verbessern und das Mehrlingsrisiko vermindern will.

Spektrum: Lassen sich Eltern vor einer künftigen Befruchtung auf genetische Schäden untersuchen? Ist speziell bei der ICSI das Risiko nicht sehr hoch, dass deformierte und genetisch abnorme Spermien des Mannes zur Befruchtung kommen, wodurch genetische Schäden an die Kinder weitergegeben werden?

Diedrich: Von der Bundesärztekammer wird empfohlen, vor einer ICSI-Behandlung eine Chromosomen-Untersuchung bei beiden Partnern durchzuführen. An unserer Universitätsklinik handhaben wir das auch so. Wir wissen, dass der Grund für eine eingeschränkte Samenqualität beim Mann häufig Chromosomen-Abnormitäten sind. Bei einer eingeschränkten Samenqualität ist daher auch mit einer erhöhten chromosomalen Fehlbildung bei den Kindern zu rechnen. Darüber müssen wir die Paare natürlich aufklären. Letztlich muss dann das Paar entscheiden, ob es dieses Risiko eingehen will.

Spektrum: Wie sieht es allgemein bei der Befruchtung »im Reagenzglas« aus – werden Paare in Deutschland vor einer solchen Behandlung standardmäßig auf genetische Anomalien untersucht?

Diedrich: Hier gibt es sicher Unterschiede zwischen niedergelassenen Reproduktionsmedizinern und den Universitätskliniken. Natürlich kosten solche Tests viel Geld, und es ist davon auszugehen, dass sie nicht überall mit derselben Sorgfalt durchgeführt werden. An unserem Klinikum wird das bei allen Paaren gemacht. Für ganz Deutschland gibt es allerdings keine klaren Zahlen, wie oft Paare vor einer künstlichen Befruchtung möglicherweise nicht untersucht werden.

Spektrum: Einiges deutet darauf hin, dass durch die Manipulationen, die während der ICSI notwendig sind, zusätzliche Schäden erzeugt werden – etwa am Spindelapparat der Eizelle. Auch ein schädlicher Einfluss der Kulturmedien wird diskutiert.

Diedrich: Grundsätzlich wird das Spermium dort injiziert, wo die Spindel nicht sitzt. Ich kann mir jedoch durchaus vorstellen, dass es manchmal zu Injektionen von Samenzellen in dem Bereich kommt, wo die Spindel lokalisiert ist – besonders bei wenig erfahrenen Kollegen. Daraus könnten sich möglicherweise Irritationen ergeben. Dass dies aber der Grund für die gering erhöhte Fehlbildungsrate bei der ICSI ist, lässt sich sicherlich schwer nachweisen.

Was die Kulturmedien betrifft, so bemühen wir uns, die Verhältnisse während der künstlichen Befruchtung den natürlichen Verhältnissen im Eileiter so gut wie möglich anzupassen. Viele Einflüsse kennen wir jedoch noch nicht. Daher sollte man den Embryo nur so kurz wie möglich außerhalb des Mutterleibs in Kultur halten und ihn so schnell wie möglich in den Uterus zurücksetzen. In Kultur wird der Embryo Einflüssen ausgesetzt, von denen wir zum Teil nicht wissen, wie negativ sie sind. Daher bin ich auch kein Freund von Langzeitkulturen, sprich dem Blastocystentransfer, bei dem Embryonen bis zu fünf Tage außerhalb des Mutterleibs kultiviert und erst dann eingepflanzt werden.

Spektrum: Mittlerweile gibt es pro Jahr mehrere zehntausend künstliche Befruchtungen allein in Deutschland. Hätte man die In-vitro-Methoden erst an kleinen Kohorten testen und erst danach auf größere Patientenzahlen übergehen sollen? War es falsch, diese Methoden gleich so zahlreich einzusetzen?

Diedrich: Bezüglich der IVF würde ich rückblickend sagen, dass dies nicht erforderlich war. Bei der ICSI dagegen wäre es sicherlich sinnvoll gewesen, erst kleine, kontrollierte Studien durchzuführen, um die Patienten besser darüber zu informieren, worauf sie sich einlassen. Ich halte es für einen Nachteil, dass dies nicht geschehen ist. Glücklicherweise hat sich bei der ICSI nichts Dramatisches gezeigt, aber immerhin müssen wir heute sagen, die Fehlbildungsrate ist gering erhöht – wahrscheinlich weniger der Methode wegen, sondern mehr auf Grund der Hintergrundrisiken, die die Paare mitbringen. So ist zum Beispiel das Alter der ICSI-Mütter im Durchschnitt höher, verglichen mit einem Normalkollektiv.

Spektrum: Wie wird die nachgeburtliche Entwicklung der in vitro gezeugten Kinder erfasst? Gibt es dazu Langzeitstudien, möglicherweise auch staatenübergreifend?

Diedrich: Im Rahmen der deutschen ICSI-Studie werden die Kinder zwei, vier und sieben Jahre nach der Geburt untersucht. Auch in anderen Ländern gibt es Studien, die diesen Aspekt prüfen; dabei handelt es sich zumeist um Initiativen, die auf nationaler Ebene von medizinischen Zentren ausgehen. Staatenübergreifende Bemühungen gibt es derzeit nicht, sie wären aber sicher zu überlegen. Allgemein liegen natürlich noch keine umfassenden Langzeitbeobachtungen vor, das erste ICSI-Kind ist ja erst zehn Jahre alt.

Spektrum: Viele Paare wünschen auch dann eine künstliche Befruchtung, wenn die Risiken für das Kind hoch sind. Raten Sie den Paaren manchmal davon ab?

Diedrich: Wenn wir sehen, dass eine schwere Erbkrankheit vorliegt und Fehlbildungen des Kindes mit größerer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind, dann raten wir durchaus von einer Behandlung ab. In solchen Fällen bin ich auch nicht bereit, die Behandlung durchzuführen. Der Anteil der Paare, bei denen wir so entscheiden, liegt jedoch unter fünf Prozent.

VORGOS NIKAS, HAMMERSMITH HOSPITAL, LONDON

Der Embryo entsteht aus inneren Zellen der Blastocyste, des Keimbläschens. Hier ist es geöffnet. In diesem Entwicklungsstadium nistet sich der Embryo in die Wand der Gebärmutter ein.

Das Interview führte **Frank Schubert**, promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Berlin.

DPA

Damit keine Mehrlinge entstehen, würden auch hier zu Lande Mediziner gern nur einen Embryo einpflanzen.

▷ gar nicht unbedingt besser sind. Es kommt vielmehr darauf an, wenige Embryonen guter Qualität zu verwenden.

Die Risiken einer Zeugung außerhalb des Mutterleibs für die Kinder drangen bisher wenig an die Öffentlichkeit. Schließlich verhalf die moderne Reproduktionsmedizin weltweit schon einigen hunderttausend Paaren zu Wunschkindern. Jetzt aber werden Stimmen von Fachleuten laut, die wesentlich mehr Zurückhaltung beim Einsatz der künstlichen Befruchtungsmethoden fordern.

Gerald Schatten, einer der weltweit renommiertesten Reproduktionsmediziner von der Universität Pittsburgh (US-Bundesstaat Pennsylvania) rief anlässlich des 25-jährigen Jubiläums der In-vitro-Befruchtung beim Menschen zu einem ARTsilomar auf. Mit dem Wort spielte er sowohl auf die künstliche Zeugung *(assisted reproductive technologies)* an als auch auf die Konferenz in Asilomar in Monterey (Kalifornien), auf der Gentechniker 1975 beschlossen, nicht alles Machbare umzusetzen.

Sein ebenso namhafter Kollege Robert Winston vom Hammersmith Hospital in London warnt davor, die beunruhigenden Befunde jüngster Studien als bloße statistische Spitzfindigkeiten abzutun, und sieht »dunkle Wolken« aufziehen. Die Warnungen gelten nicht zuletzt Experimenten, deren Sicherheit noch kaum überprüft ist. So brandmarkten Forscher als Abenteurertum, unreife Spermien zur Befruchtung zu verwenden. Als ebenso fragwürdig gelten Versuche, Eizellen älterer Frauen mittels Plasma aus Eizellen junger Frauen zu verjüngen, um die Chancen für eine Schwangerschaft zu erhöhen. Als in den USA daraufhin Kinder mit genetischen Defekten zur Welt kamen, erteilte die amerikanische Gesundheitsbehörde strengere Auflagen.

Die Epidemiologin Jennifer Kurinczuk von der Universität Leicester (England) forderte dazu auf, »unliebsame Befunde nicht länger unter den Teppich zu kehren«. Ihr liegt vor allem an einer umfassenden Aufklärung der Paare, damit diese ihre Entscheidung in Kenntnis möglicher Risiken treffen. Der unbedingte Wunsch nach einem Kind macht die Aufklärung jedoch nicht gerade leicht. Die Paare neigen dazu, sogar erhebliche Risiken in Kauf zu nehmen. Anja Pinborg von der Universität Kopenhagen fand in einer Umfrage, dass selbst betroffene Mütter von einer zweiten Mehrlingsschwangerschaft nur dann absehen, wenn die bereits geborenen Kinder schwerste Schäden haben. Nach einer Umfrage in den Niederlanden bestand jedes zweite Paar auf einer künstlichen Befruchtung, obwohl beim Mann Chromosomenanomalien festgestellt worden waren, die sich mit einiger Wahrscheinlichkeit weitervererben konnten. Einige der Paare, die auf natürliche Weise keine Kinder zu zeugen vermochten, bevorzugten sogar von vornherein Mehrlinge.

Plädoyer für mehr Zurückhaltung und gründlichere Begleitstudien

Die vielen Mehrlingsschwangerschaften bezeichnen nicht nur Kinderärzte inzwischen als eines der größten medizinischen Desaster unserer Zeit. In Deutschland warnte Henning Beier, Direktor des Instituts für Anatomie und Reproduktionsbiologie in Aachen, bereits 1997 davor, sich nicht dazu verleiten zu lassen, »die immensen gesundheitlichen Risiken und sozialen Probleme bei Mehrlingsgeburten dem alleinigen Ziel eines hohen Schwangerschaftserfolgs nach assistierter Reproduktion unterzuordnen«. Seinem Gutachten war unter anderem zu verdanken, dass in Deutschland die Richtlinie eingeführt wurde, Frauen unter 35 Jahren statt üblicherweise drei nur noch zwei Embryonen zu übertragen.

Raymond Lambert von der Université Laval in Quebec (Kanada) warf seinen Kollegen aus der Reproduktionsmedizin kürzlich vor, unverantwortlich gehandelt zu haben, als sie diese Schwangerschaften in so großer Zahl begünstigten. Der Transfer mehrerer Embryonen hätte niemals übliche klinische Praxis werden dürfen. Wie tief die Reproduktionsmediziner in dieser Frage zerstritten sind, zeigt sich an der Antwort von Norbert Gleicher vom Center for Human Reproduction in Chicago. Er weist den Vorwurf zurück und beharrt darauf, allein den Eltern sei das Recht der Entscheidung vorbehalten.

Art und Ausmaß der Debatte um die Sicherheitsrisiken zeugen von der Unsicherheit sämtlicher Beteiligten. Denn bei aller Stichhaltigkeit der Beweisführung darf nicht übersehen werden, dass außer den In-vitro-Maßnahmen selbst auch andere Ursachen in Frage kommen. In einer Analyse der Gesundheitsrisiken von Retortenkindern erläutert Robert Edwards, einer der »Väter« von Louise Brown, dass einen erheblichen Teil hierzu ungünstige Bedingungen im Mutterleib beitragen könnten. Lambert wertet neuerdings sogar die Unfruchtbarkeit der Frauen als Hauptrisikofaktor.

Umso dringlicher ist eine intensive Erforschung dieser Fragen. Alastair Sutcliffe vom Center for Community Child Health in London war einer der ersten Pädiater, der nach möglichen Schäden bei in vitro gezeugten Kindern fahndete. Er verlangte bereits im letzten Jahr im »British Medical Journal«, endlich aussagekräftige Studien durchzuführen, welche die Frage nach gesundheitlichen Risiken verlässlich beantworten könnten. Den künstlich gezeugten Kindern, so meint er, würde nur schwer zu vermitteln sein, dass man sie womöglich einem erhöhten Risiko ausgesetzt habe – vor allem wenn diese Kinder erkennen müssten, dass Sicherheit nicht das oberste Gebot für jene war, die ihre Eltern bei der Zeugung unterstützt haben. ◁

Martina Lenzen-Schulte ist promovierte Medizinerin und Wissenschaftsjournalistin.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Das Recht der Fortpflanzung im 21. Jahrhundert in: Zeitschrift Reproduktionsmedizin, Bd. 18, Heft 4, August 2002.

IVF-Children: The First Generation. Von Alastair Sutcliffe (Hg.). Parthenon, New York 2002.

Review – The Science of Art. Von Richard M. Schultz und Carmen J. Williams in: Science, Bd. 296, 21. Juni 2002, S. 2188.

Seeds of Doubt. Von Kendall Powell in: Nature, Bd. 422, 17. April 2003, S. 656.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Kerze

Advent, Advent …

Von Werner Gans

Mögen Designerlampen, Halogenspots oder Neonröhren die Nacht zum Tage machen – kaum eine andere Lichtquelle vermittelt ein solches Gefühl von Behaglichkeit wie die Kerze. Ihr warmer Schein verkörpert zudem in vielen Religionen das Göttlich-Mystische, die Hoffnung, den Sieg des Guten. So ist das Entzünden der vier Kerzen des Adventskranzes im Dezember hier zu Lande ein beliebtes Ritual.

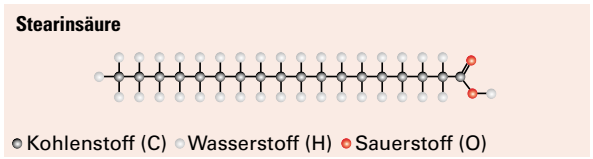
Mag eine brennende Kerze auch geheimnisvoll wirken, aufgebaut ist sie denkbar einfach: Ihr Körper, der Brennstoff, besteht aus Paraffin, Wachs oder Stearin. Ihn durchzieht als Docht ein mit Wachs getränkter Baumwollfaden. Alle diese Materialien bestehen aus langen Kohlenwasserstoffketten. Bei Raumtemperatur sind sie fest; erst beim Anzünden des Dochtes schmelzen sie. Die Flamme zerlegt die langen Molekülketten in kleinere, die gasförmig und wesentlich agiler sind als der Ausgangsstoff. Ihre Wasserstoffatome reagieren mit dem Luftsauerstoff der Umgebung – es entsteht Wasser in der Flamme. Dabei wird sehr viel Energie frei – die Flammentemperatur steigt auf fast tausend Grad. Die Kohlenstoffatome des Brennstoffs bilden nun Rußpartikel, die gelb aufglühen. Sie verbrennen schließlich mit Luftsauerstoff zu Kohlendioxid. Die Kapillarwirkung des Dochtes liefert beständig flüssigen Brennstoff nach.

Neben Kienfackeln waren Kerzen lange Zeit die einzige künstliche Lichtquelle. Zu Luthers Zeit verbrannten beispielsweise in der Schlosskirche zu Wittenberg während eines Jahres 35 750 Pfund dieser Leuchtmittel. Kerzen bestanden bis in das 19. Jahrhundert meist aus Talg (»Unschlittlicht«) oder Wachs. Ersterer wurde vor allem aus Rinderfett gewonnen; Bienen- oder pflanzliches Wachs war sehr teuer und blieb somit lange Kirche und Adel vorbehalten. Ersatzweise nutzte man auch Walrat, eine fettartige weiße Masse aus der Stirnhöhle der Pottwale; doch solche Lichter brannten schnell nieder.

Im Jahre 1825 gelang es dem französischen Chemiker Michel Eugène Chevreul (1786–1889), aus Fett Stearin herzustellen. Etwa gleichzeitig erfolgte die Isolierung von Paraffinwachs aus Petroleum. Paraffinwachs besteht aus langkettigen Kohlenwasserstoffen, die Fettsäure Stearin ist ebenso aufgebaut, trägt zusätzlich aber eine Säuregruppe am Molekülende. Diese reinen und in großer Menge billig herzustellenden Stoffe bildeten die Basis einer boomenden Kerzenindustrie, bis die Glühlampe ihren Siegeszug antrat. Doch erst um 1920 hat die elektrische Beleuchtung in den Industrienationen das Kerzenlicht in die Nische »besondere Anlässe« verdrängt.

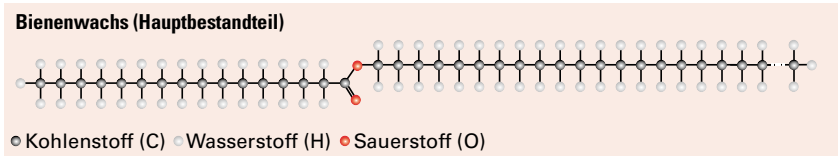
Bienenwachskerzen erfreuen sich großer Beliebtheit. Der Brennstoff ist ein Naturprodukt und wird von den Arbeiterbienen aus Zucker produziert. Bienenwachs enthält neben wachsartigen Bestandteilen, darunter auch Paraffine, mehr als fünfzig Aromastoffe, die ihm seinen charakteristischen Honiggeruch verleihen. Deshalb gehören zu jedem Weihnachtsmarkt Kerzen aus Bienenwachs unbedingt dazu. ◁

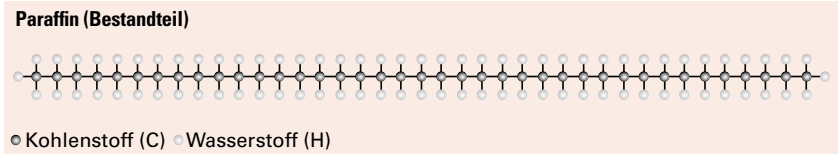
Werner Gans ist promovierter Chemiker, koordiniert Graduiertenkollegs an der Freien Universität Berlin und arbeitet als Übersetzer wissenschaftlicher Texte.



Den Brennstoff einer Kerze bilden langkettige Kohlenwasserstoffmoleküle, wie sie in Wachs, Stearin (Gemisch aus Stearin- und Palmitinsäure) und Paraffin vorkommen.

Die Wärme der Flamme bricht die Ketten in kleinere Einheiten, die dann mit dem Luftsauerstoff reagieren. Nach dieser »Initialzündung« liefert zunächst die Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff sehr viel Energie. Damit heizt sich das Zentrum der Flamme so stark auf, dass Rußpartikel zu leuchten beginnen. Auch die exotherme Reaktion von Kohlenstoff und Sauerstoff zu Kohlendioxid steigert die Flammentemperatur.





WUSSTEN SIE SCHON?

▶ Eine Kerze birgt auch **Brandgefahr**, ein Schritt in Richtung Sicherheit erfolgte erst Ende des 20. Jahrhunderts: Durch Imprägnieren des unteren Dochtendes wird dort die Kapillarwirkung unterbunden, eine Sicherheitskerze erlischt deshalb schließlich von selbst.

▶ **Kerzenfabriken** produzieren das ganze Jahr hindurch. Ihre Produkte werden entweder in eine Form gegossen, aus Pulvern oder Granulat gepresst oder durch mehrmaliges Ziehen des Dochtes durch flüssiges Wachs hergestellt. Der größte Umsatz wird freilich hier zu Lande in den Monaten September bis November erzielt, wenn etwa zwei Drittel der Jahresproduktion verkauft werden.

▶ Die **Schwerkraft** sorgt dafür, dass warme Gase aufsteigen. Erst vor etwa fünf Jahren wurde eine Kerze in einem Raumschiff gezündet. Während sie auf der Erde nur zehn Minuten gebrannt hätte, leuchtete sie unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit 45 Minuten lang, denn die Verbrennungsgase wurden nur langsam abgeführt. Auch war die Temperatur der Kerze wegen der geringen Luftzufuhr so niedrig, dass kaum Rußpartikel erglühten, die Flamme war also blau und wegen der abwesenden Schwerkraft kugelrund.

▶ Die Intensität einer Lichtquelle wird in **Candela** gemessen (nach lateinisch *candela* für Wachsschnur, Kerze). Als ein Candela wurde ursprünglich in England die Intensität einer Kerze definiert, die in einer Stunde 7,77 g Walrat verbraucht. Heutzutage nutzt man zur Definition die Strahlung eines schwarzen Körpers bei der Schmelztemperatur von Platin.

Als Erfinder des Adventskranzes gilt Johann Wichern (1808–1881), evangelischer Theologe und Gründer der Anstalt »Das Rauhe Haus« in Hamburg-Horn. Am ersten Advent des Jahres 1838 ließ er dort für eine Andacht Wachskerzen im Rund aufstellen. Ab Dezember 1840 wurden 24 Kerzen auf einem großen Holzreifen aufgesteckt und im Laufe der Adventszeit angezündet. Ab 1851 schmückten zudem Tannenzweige den Reifen als Zeichen des Lebens. Der Brauch verbreitete sich in den evangelischen Familien Norddeutschlands und wurde nach dem Ersten Weltkrieg von der Jugendbewegung in ganz Deutschland etabliert.

THOMAS WAGNER

Klimakapriolen der Kreidezeit

Vor 94 Millionen Jahren glich die Erde einem Dampfbad. Große Teile der Meere verwandelten sich in stinkende Kloaken, an deren Boden sich totes Biomaterial anhäufte. Zu Schwarzschiefer geworden, enthüllt es, dass auch in dieser extremen Treibhauswelt Schwankungen der Erdbahn das Klima beeinflussten.

Von Thomas Wagner, Wolfgang Kuhnt und Jaap S. Sinninghe Damsté

Unser heutiges Wissen über kurzfristige Veränderungen im Weltklima und ihre Ursachen stützt sich zum großen Teil auf Erkenntnisse über natürliche Klimaschwankungen während der vergangenen 2,5 Millionen Jahre. Dieser Zeitraum ist jedoch keineswegs typisch für die Erdgeschichte. Wir Menschen leben seit dem Auftauchen unserer Gattung in einer »Eishauswelt«, deren Klimadynamik eng mit dem raschen Auf- und Abbau ausgedehnter Gletscher in hohen Breiten verbunden ist. Entsprechend herrscht zwischen den Polen und dem Äquator ein relativ steiler Temperaturgradient. Während mindestens der Hälfte der letzen 540 Millionen Jahre – der Zeit, in der es höheres vielzelliges Leben gibt – war die Erde dagegen eine Treibhauswelt mit eisfreien Polkappen und geringen Temperaturunterschieden zwischen hohen und niedrigen Breiten.

Solche weltumspannenden »Dampfbäder« bildeten die Endzustände einer sich mehrfach kontinuierlich aufheizenden Atmosphäre. Sie im Detail zu erfor-

THOMAS WAGNER

Fein geschichtete Schwarzschiefer und karbonatreiche Zwischenlagen wechseln sich in diesen Sedimentdecken bei Tarfaya im Südwesten Marokkos ab. Sie stammen aus den Kreidestufen Cenoman und Turon vor 90 bis 100 Millionen Jahren und zeugen von der Ablagerung gewaltiger Mengen unzersetzter organischer Biomasse am Meeresboden. Wie die Detailaufnahme links oben zeigt, sind die Sedimente selbst noch im Millimeterbereich geschichtet (laminiert).

schen erscheint angesichts der aktuellen Diskussion über Treibhauseffekt und globale Erwärmung ausgesprochen sinnvoll. Welche Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Biosphäre herrschten damals und wie unterscheiden sie sich von den heutigen? Antworten auf diese und ähnliche Fragen sollten helfen, das irdische Klimasystem besser zu verstehen und seine künftige Entwicklung angesichts menschlicher Eingriffe genauer vorhersagen zu können.

Als die gesamte Erde ein riesiges Treibhaus war

Das wohl bekannteste und am besten untersuchte Beispiel einer lang anhaltenden Treibhausphase bietet die Kreidezeit vor 140 bis 65 Millionen Jahren. Hauptursache der ungemütlich hohen Temperaturen, bei denen sich die Dinosaurier allerdings ausgesprochen wohl fühlten, war ein Gas, das auch in der heutigen Klimadiskussion eine entscheidende Rolle spielt: das Kohlendioxid. Es lässt sichtbares Sonnenlicht passieren, hält aber die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung zurück und wirkt so wie das Glasdach eines Treibhauses.

Während derzeit der Mensch die Atmosphäre mit Kohlendioxid belädt, waren es damals allerdings untermeerische Vulkane. Im Zeitraum zwischen 125 und 80 Millionen Jahren vor heute (den Kreidestufen Apt bis Untercampan) kam es zu langen Phasen intensiver vulkanischer Aktivität im Ozean. Dabei trat nicht nur so unvorstellbar viel Lava aus, dass riesige submarine Plateaus entstanden; die Feuerberge pumpten auch gewaltige Mengen an Kohlendioxid in den Ozean, von denen ein Teil letztendlich in die Luft gelangte. Der Gehalt der Atmosphäre an dem Treibhausgas stieg dadurch auf das Vier- bis Zwölffache des momentanen Wertes von 0,038 Volumenprozent.

Die Folge war ein enormer Wärmeschub, der weit reichende Auswirkungen auf die Biosphäre sowie den globalen Wasser- und Kohlenstoffkreislauf hatte. Auf dem Höhepunkt der Entwicklung vor etwa 94 Millionen Jahren – am Übergang zwischen den Kreidestufen Cenoman und Turon – lagen die durchschnittlichen Lufttemperaturen um 7,5 bis 8,5 Grad Celsius höher als heute. Das ergibt sich aus globalen Klimamodellen. Die Temperaturverhältnisse im Ozean lassen sich dagegen aus dem Mengenverhältnis der Sauerstoff-Isotope in kalkschaligen Einzellern (Foraminiferen) rekonstruieren. Längs des Äquators herrschten damals im oberflächennahen Wasser im Mittel fast 34 Grad. In mittleren Breiten waren es noch über 25 Grad, während die Oberflächentempe- ▷

ratur in polaren Meeresregionen im Jahresverlauf zwischen 0 und 18 Grad variierte. Selbst in Wassertiefen von etwa einem Kilometer herrschten vermutlich noch 15 bis 18 Grad. Zum Vergleich: Heute betragen die höchsten Oberflächentemperaturen am Äquator durchschnittlich etwa 27 Grad, während die Temperatur des Tiefenwassers bei rund 4 Grad liegt.

Allerdings war diese klimatische Extremsituation keineswegs stabil. Da in der Treibhauswelt der Kreide wenig oder gar kein Wasser auf dem Festland als Eis gebunden war und zudem submarin große Mengen an Lava ausflossen und Plateaubasalte bildeten, lag der Meeresspiegel bis zu 250 Meter über dem heutigen Niveau. Dadurch standen viele küstennahe Tiefländer unter Wasser, und die Landfläche war um etwa 20 Prozent kleiner als heute. Als Folge davon existierten weit ausgedehnte, flache Randmeere über den Schelfgebieten und sogar Wasserverbindungswege quer durch die Kontinente (etwa in Nordamerika und Zentralafrika).

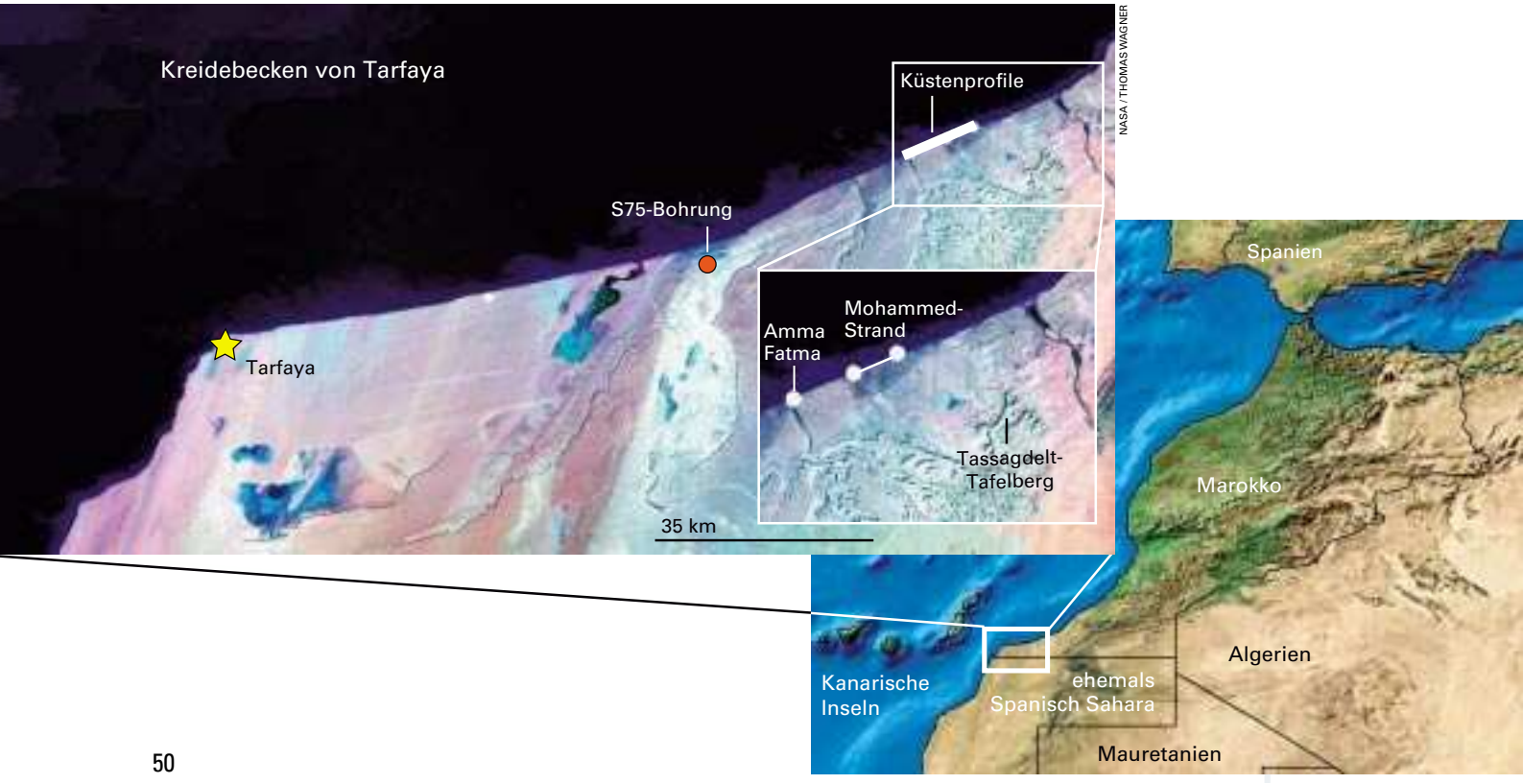
Eutrophierung der Ozeane

Zugleich herrschte ein feucht-heißes Klima mit reichlich Niederschlag, der die Verwitterung intensivierte und den Eintrag von Mineralstoffen ins Meer verstärkte. Außerdem pumpte die am Meeresboden ausfließende Lava große Mengen an Spurenmetallen und Nährstoffen in den tiefen Ozean. All das ließ Algen und Plankton entlang der Kontinentalränder, aber auch in begünstigten Tiefseeregionen üppig gedeihen. Eine solche Eutrophierung ist heute nur in überdüngten Seen und in Randmeeren wie der Ostsee bekannt, die keine richtige Verbindung zum Ozean haben. Die im obersten Wasserstockwerk in großen Mengen produzierte Biomasse sammelte sich nach dem Absterben weitgehend unzersetzt am Meeresboden, da der Sauerstoff in dem warmen und langsam strömenden Zwischen- und Tiefenwasser nicht ausreichte, um das tote organische Material zu oxidieren.

Dies hatte erhebliche Konsequenzen für die globale Kohlendioxid-Bilanz: Das wuchernde Plankton entzog der Atmosphäre massiv Kohlendioxid und deponierte es am Meeresboden dauerhaft als organisches Material. Das zeigt sich heute noch in ungewöhnlichen Mengenverhältnissen der verschieden schweren Kohlenstoff-Isotope in marinen Sedimenten aus dieser Zeit. Demzufolge wurde am Übergang vom Cenoman zum Turon über einen Zeitraum von knapp einer Million Jahre die ungeheure Masse von etwa 1,6 Milliarden Tonnen Kohlenstoff jährlich am Meeresboden vergraben – mehr als das Zehnfache der 100 bis 140 Millionen Tonnen, die sich dort gegenwärtig ablagern. Nach Abschätzung von Geochemikern am Königlichen Niederländischen Institut für Meeresforschung (NIOZ) auf Texel fiel dadurch die Konzentration an Kohlendioxid in der Luft um 40 bis 80 Prozent – auf etwa das Doppelte des heutigen Niveaus.

Die Folgen für das Klima und die Biosphäre waren drastisch. Nach Modellierungen sank die durchschnittliche Lufttemperatur um etwa zwei bis vier Grad Celsius, womit sie freilich immer noch um vier bis sechs Grad höher lag als heute. Nach einer solchen Abkühlungsphase ließ der anhaltend hohe vulkanische Ausstoß von Kohlendioxid die Temperaturen allerdings wieder langsam ansteigen. Ein neuer Zyklus aus Aufheizung und nachfolgendem Temperatursturz begann.

Die extremen Klimaverhältnisse der Kreidezeit haben sich in einer äußerst ungewöhnlichen Art von Meeressedi-



Lage des Kreidebeckens von Tarfaya. Aufschlüsse von Schwarzschiefer-Sedimenten finden sich an Abschnitten der Küste – so am Mohammed-Strand und bei dem Ort Amma Fatma – sowie im Landesinnern – zum Beispiel an den Rändern des Tassagdelt-Tafelbergs. Gesteinsprofile der kreidezeitlichen Sedimente lieferten auch zahlreiche Bohrungen, die der Suche nach Erdöl dienten. Hier ist nur die mit der Nummer S75 eingezeichnet, da die dabei gewonnenen Kerne am intensivsten untersucht wurden.

menten verewigt: den so genannten Schwarzschiefern. Es handelt sich um dunkle, feinkörnige, meist fein geschichtete (laminierte) Ablagerungen. Ihre Farbe rührt von extrem hohen Konzentrationen an organischem Kohlenstoff und Pyrit (FeS_2) her. Die Feinschichtung (Laminierung) lässt zugleich darauf schließen, dass es am Meeresboden damals keine Kleinstlebewesen gab, welche die obersten Sedimentschichten durchwühlten. Dadurch blieben auch kurzfristige Wechsel in der Ablagerung erhalten.

Schwarzschiefer sind übrigens nicht nur als Zeugen einstiger Klimaextreme von Interesse. Sie haben auch große wirtschaftliche Bedeutung, da sie rund die Hälfte aller Erdölmuttergesteine stellen, aus denen wir unseren heutigen Weltenergiebedarf decken.

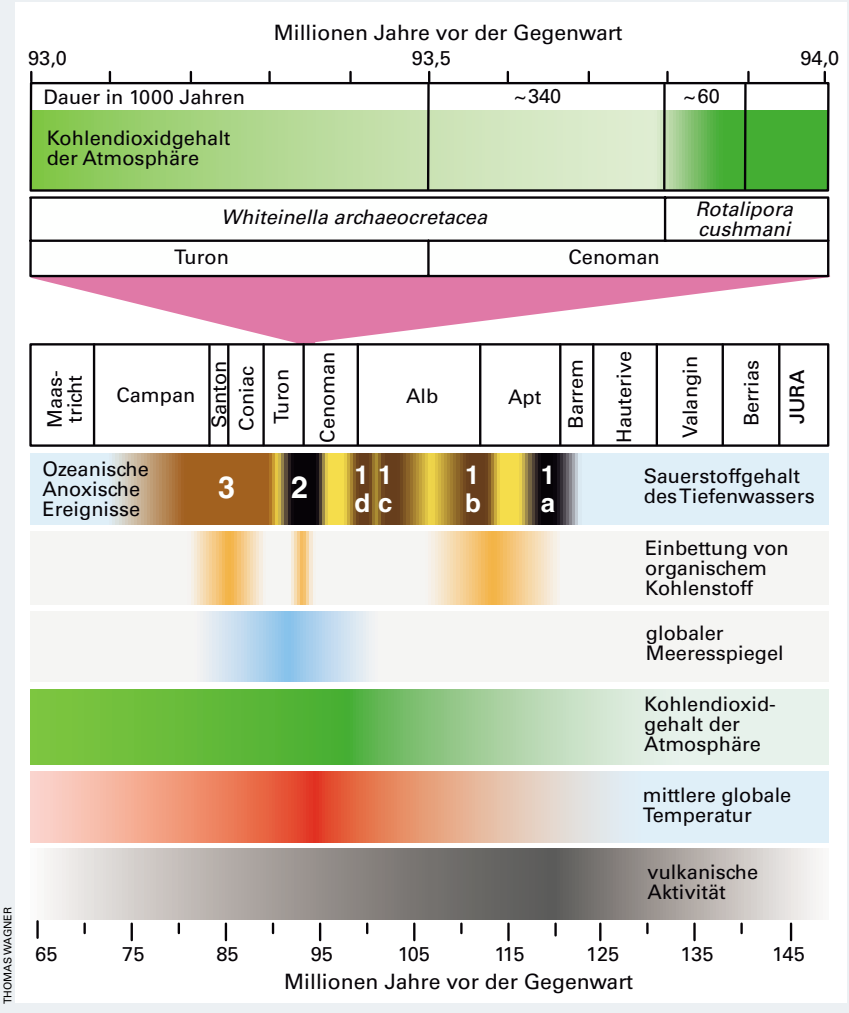
Stinkende Schwefelgase unter der Wasseroberfläche

Sowohl die Laminierung als auch der hohe Gehalt an organischem Kohlenstoff und Pyrit resultieren offenbar daraus, dass zur Zeit der Sedimentation weite Bereiche des offenen Ozeans vom Boden bis nahe an die Oberfläche anoxisch, das heißt frei von Sauerstoff waren. Nur unter diesen Extrembedingungen konnten sich solch gewaltige Mengen an organischem Kohlenstoff unzersetzt ablagern und Eisenionen in reduzierter, zweiwertiger Form als sulfidisches Pyrit ausfallen. Die lebensfeindlichen Verhältnisse erklären auch das Fehlen von wühlenden Organismen am Meeresboden.

Einen weiteren Beweis für die Abwesenheit von Sauerstoff liefern organisch-geochemische und isotopenchemische Untersuchungen von Wissenschaftlern am NIOZ und am Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie in Bremen. Demnach finden sich sowohl in kreidezeitlichen Schelfablagerungen aus der Region von Tarfaya in Südmarokko als auch in den zeitgleichen Tiefseesedimenten aus dem südlichen Nordatlantik spezielle organische Verbindungen, die von grünen Schwefelbakterien stammen. Weiter nördlich, vor Nordamerika und Europa, wurden sie ebenfalls nachgewiesen, allerdings in wesentlich geringeren Konzentrationen. Das Besondere an den grünen Schwefelbakterien ist, dass sie nur unter anaeroben Bedingungen – das heißt in Abwesenheit von Sauerstoff – Photosynthese betreiben, und das mit ▷

Entwicklung einer Extremsituation

Mehrere Faktoren trugen zum extremen Klima der Kreidezeit bei. Intensiver Vulkanismus pumpte große Mengen Kohlendioxid in die Atmosphäre. Der resultierende Treibhauseffekt heizte die Erde auf und ließ den Meeresspiegel um bis zu 250 Meter über das heutige Niveau steigen. Im warmen, überdüngten Oberflächenwasser begannen planktonische Organismen zu wuchern. Nach ihrem Absterben zehrten sie beim Absinken in die Tiefe den vorhandenen Sauerstoff auf. So kam es zu insgesamt drei »Ozeanischen Anoxischen Ereignissen«, bei denen sich weite Teile des Ozeans in sauerstofflose Kloaken verwandelten. Am Meeresboden sammelten sich große Mengen toter Biomasse an und bildeten Schwarzschiefer. Das zweite solche Ereignis war das ausgedehnteste und fand vor etwa 94 Millionen Jahren am Übergang der Stufen Cenoman und Turon statt. Die großräumige Sedimentation toter Biomasse wirkte dabei auf das Klima zurück. Weil das absinkende Plankton das aus der Luft aufgenommene und assimilierte Kohlendioxid dauerhaft am Meeresboden speicherte, entzog es der Atmosphäre große Mengen des Treibhausgases. Dies lässt sich anhand von Kohlenstoff-Isotopenprofilen von organischen Verbindungen und Karbonaten in den Meeressedimenten verfolgen. Demnach ging der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre innerhalb von höchstens 60 000 Jahren – zunächst langsam und dann sehr rasch – um 40 bis 80 Prozent zurück. Auf diesem tiefen Niveau blieb er rund 340 000 Jahre lang, bevor er allmählich wieder auf den Ausgangswert anstieg. Zeitgleich mit dem rapiden Rückgang der Kohlendioxidkonzentration tritt die Foraminifere (Einzeller mit Kalkschale) *Whiteinella archaeocretacea* an die Stelle von *Rotalipora cushmani*.



▷ Schwefelwasserstoff statt Wasser. Aus ihrem Vorkommen und ihrer Konzentrationsverteilung folgt also, dass der damals schon mehrere tausend Meter tiefe südliche Nordatlantik nicht nur keinen Sauerstoff enthielt, sondern in der lichtdurchfluteten (photischen) Zone sogar reich an freiem Schwefelwasserstoff gewesen sein muss. Leben konnte, abgesehen von wenigen speziell angepassten Mikroorganismen, unter solch extremen Bedingungen nicht existieren: Der größte Teil des Ozeans war biologisch so gut wie tot. Heute kommen derartige Bedingungen im offenen Ozean nicht vor, sondern treten nur gelegentlich in einzelnen Randmeeren wie dem Schwarzen Meer und kontinentalen Seen auf.

Großräumige Entstehung mariner Schwarzschiefer

Insgesamt kennt man aus der Kreidezeit drei solche Phasen, in denen marine Schwarzschiefer abgelagert wurden. Sie markieren einen geologisch kurzen Zeitabschnitt von wenigen Millionen Jahren, der jeweils mit dem Höhepunkt eines Erwärmungszyklus beginnt. Geowissenschaftler bezeichnen sie als Ozeanische Anoxische Ereignisse (OAEs). Die Sedimente an der Cenoman-Turon-Grenze stammen vom zweiten und zugleich am stärksten ausgeprägten OAE.

Welche Faktoren mussten zusammenkommen, um die großräumige Bildung der marinen Schwarzschiefer zu ermöglichen? Obwohl diese Frage schon lange untersucht wird, herrscht über die Antwort noch kein völliges Einvernehmen. Für viele Wissenschaftler steht die gesteigerte Produktion von Biomasse in der lichtdurchfluteten Zone des Ozeans im Vordergrund. Als moderne Analoga sehen sie die Meeresregionen vor Südwestafrika oder Peru an. Dort fördern seewärts gerichtete Passatwinde den Aufstieg nährstoffreicher Wassermassen entlang des oberen Kontinentalhangs, was die Bildung von Plankton an der Oberfläche fördert. Nach dem Absterben sinkt das organische Material ab und wird zersetzt.

Da es dabei den Sauerstoff in den tieferen Wasserschichten aufzehrt, entstehen Sauerstoffminimum-Zonen im Bereich des oberen Kontinentalhangs. In ihnen kann das herabrieselnde organische Material nicht mehr vollständig abgebaut werden, sodass sich organikreiche Sedimente am Meeresboden ablagern. Die Ozeanischen Anoxischen Ereignisse der Kreidezeit kann man sich als extreme Ausweitung solcher Sauerstoffminimum-Zonen bis in tiefe Bereiche des Ozeans vorstellen.

Andere Wissenschaftler halten dagegen die Sauerstoffarmut im Zwischen- und Tiefenwasser für die primäre Ursache und erklären sie mit dem besonderen Strömungsmuster in den damaligen Ozeanen, das ihrer Ansicht nach keinen wirksamen vertikalen Austausch von Wassermassen und damit auch keine Anreicherung der tieferen Schichten mit Sauerstoff zuließ. Als modernes Pendant betrachten sie das Schwarze Meer, in dem trotz relativ niedriger biologischer Produktivität Sedimente mit ungewöhnlich hohem Anteil an organischem Material abgelagert werden. Der Grund ist in diesem Fall, dass in den tieferen Wasserschichten fast kein Sauerstoff vorkommt. Darum kann auch das Wenige an organischem Material, das in die Tiefe sinkt, nicht zersetzt werden.

Zweifellos haben Besonderheiten der Meeresströmung, die mit der damaligen Landverteilung zusammenhängen, bei der Ablagerung der Schwarzschiefer eine wichtige Rolle gespielt. Da die Temperaturdifferenz zwischen äquatorialen und polaren Regionen im Oberflächenwasser des Kreideozeans insgesamt deutlich geringer war als heute, trugen die Meere vermutlich nur wenig zum Wärmetransport bei. Dies steht in krassem Gegensatz zur jetzigen Situation, in der es hauptsächlich ozeanische Strömungen sind, die für den globalen Energietransfer sorgen.

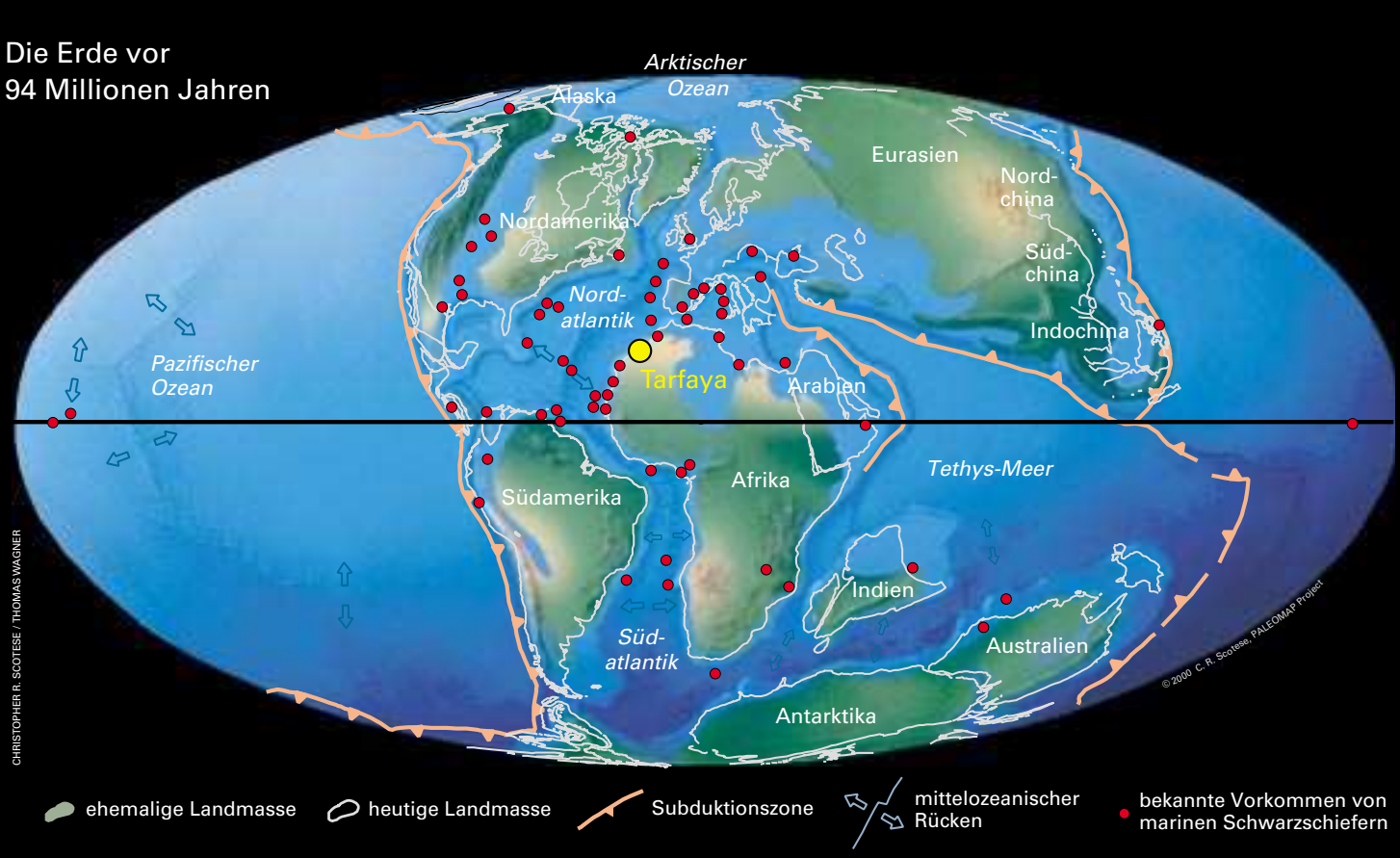
Sauerstoffmangel im stagnierenden Meerwasser

Wie aber funktionierte der Energieaustausch in der Oberkreide? Mit dieser Frage beschäftigen sich seit längerem Wissenschaftler am Forschungszentrum Geomar in Kiel. Ihren Simulationen zufolge übernahm die Atmosphäre den Löwenanteil am Wärmetransport. Dabei kam dem Wasserdampf eine entscheidende Rolle zu. Da warme Luftmassen mehr Wasserdampf aufnehmen und transportieren können als kalte, brauchten Geschwindigkeit und Intensität der globalen atmosphärischen Zirkulation in der Kreidezeit nicht unbedingt größer zu sein als heute, um trotzdem weitaus größere Mengen an Wärme zwischen den Breitengraden austauschen zu können. Außerdem kam es nach den Ergebnissen der Kieler Forscher verstärkt zu orkanartigen Stürmen, von denen viele in den Flachmeerregionen als markante Sturmflutlagen überliefert sind.

Der hohe Gehalt der Atmosphäre an Wasserdampf und Kohlendioxid führte auch zu ungewöhnlich hohen Verdunstungs- und Niederschlagsraten. Das muss starke regionale Unterschiede im Salzgehalt des Meeres hervorgerufen haben. Sie dürften anstelle der fehlenden Temperaturgradienten der Motor für die Zirkulation des Meerwassers gewesen sein. Die Umstellung auf eine solche verstärkt salzgetriebene Strömung brachte auch grundlegende Änderungen in der Struktur des Meeres mit sich. So lagern heute zwischen den oberflächennahen und den tiefen Schichten kalte, salzarme Zwischenwassermassen. In der Oberkreide waren die Ozeane in diesem Stockwerk dagegen vermutlich warm und salzreich; hierdurch bedingt lag die Konzentration an Sauerstoff dort deutlich unter derjenigen im heutigen Meer.

Von entscheidendem Einfluss auf die Tiefenwasserzirkulation war zweifellos auch die besondere Landverteilung während der Kreidezeit. Die Weltkarte zur Zeit des Cenoman unterscheidet sich deutlich von der heutigen (Bild rechts). So erstreckte sich damals entlang der nördlichen Subtropen und der gemäßigten Breiten ein ausgedehntes Meer namens Tethys als breite Verbindung zwischen dem Pazifik und Nordatlantik (es hat sich inzwischen bis auf den kümmerlichen Rest des Mittelmeers geschlossen). Andererseits war der Atlantik erst im Entstehen; in der Äquatorregion hatte er sich noch nicht vollständig geöffnet. Dadurch konnte keine wirksame Zirkulation von Wassermassen zwischen dem nördlichen und dem noch recht schmalen südlichen Teil des neuen Ozeans stattfinden. Dies trug maßgeblich zur unzureichenden Durchmischung und Belüftung der Wassermassen bei. In dem Maße, wie sich der äquatoriale Atlantik öffnete, ging in der Oberkreide dann auch die Sedimentation von Schwarzschiefern zurück.

Zusammenfassend zeichnen die geschilderten Befunde ein hochkomplexes Bild von der Entstehung der Schwarzschiefer. Die Intensivierung des Treibhauseffekts durch Kohlendioxid vulkanischen Ursprungs erwärmte den Ozean bis hinab in die Tiefsee und verstärkte



gleichzeitig den Wasserkreislauf auf den Kontinenten, was die Verwitterung und den Abfluss von Nährstoffen ins Meer steigerte. Parallel dazu nahmen Intensität und Häufigkeit von Stürmen zu. Seewärts gerichtete Winde sorgten für einen verstärkten Auftrieb von warmen und nährstoffreichen Wassermassen entlang der weit gefluteten Kontinentalränder.

All das schuf ideale Bedingungen für das Wachstum von Plankton im flachen Kreideozean und förderte die Ausbreitung warmer, salzreicher Zwischen- und Tiefenwassermassen in den tieferen Meeresschichten. Infolgedessen bildeten sich sowohl entlang der Kontinentalhänge als auch in den zentralen Ozeanbecken ausgedehnte anoxische Zonen. Meerwasser mit wenig oder gar keinem Sauerstoff und eine hohe biologische Produktivität nahe der Oberfläche führten letztendlich dazu, dass große Mengen organischen Materials in geologisch kurzer Zeit am Boden abgelagert wurden.

Der Brennpunkt des Geschehens

Zu den Regionen, an denen dies geschah, gehörte insbesondere der Kontinentalhang im Nordwesten Afrikas, der durch eine Vielzahl flacher Becken auf dem Schelf gegliedert war. An einem davon, dem Kreidebecken von Tarfaya im äußersten Südwesten Marokkos, lässt sich die Ablagerung ausgesprochen gut erkennen und im Detail untersuchen. In den etwa 500 Meter mächtigen, zyklisch aufgebauten Kalk-Mergel-Abfolgen sind die extremen einstigen Treibhausbedingungen mit sehr hoher zeitlicher Auflösung überliefert. Auf einer Länge von etwa 700 und einer Breite zwischen 100 bis 250 Kilometern, was einer Gesamtfläche von ungefähr 125 000 Quadratkilometern entspricht, lagern rund 625 000 Kubikkilometer Kreidesediment.

Bilanzierungen machen die herausragende Rolle dieses kleinen Schelfbeckens als bedeutende Senke für organischen Kohlenstoff deutlich. Obwohl das Gebiet nur ungefähr 0,05 Prozent der damaligen globalen Meeresfläche einnahm, wurden dort rund fünf Prozent des weltweit abgelagerten organischen Kohlenstoffs deponiert. Daraus errechnet sich ein Anreicherungsfaktor von etwa hundert gegenüber dem restlichen Kreideozean.

So nimmt es nicht wunder, dass die Region von Tarfaya heute nicht nur Ziel von Explorationen der Erdölindustrie, sondern auch ein Schwerpunkt der internationalen Forschung über das kreidezeitliche Treibhausklima ist. Sie gilt als Schlüssel zur Rekonstruktion kurzfristiger Umweltveränderungen, die auf dem Höhepunkt der Erwärmung stattfanden: der Wende vom Cenoman zum Turon. Seit einigen Jahren beschäftigt sich eine internationale Gruppe von Geowissenschaftlern der Universitäten Bremen, Kiel, Marrakesch und Poitiers sowie des University College London und des NIOZ mit der Erforschung der spektakulären Sedimentabfolgen in Tarfaya.

Die Land-Meer-Verteilung zu Beginn des Turon unterscheidet sich deutlich von der heutigen. Der Atlantik begann sich damals erst zu öffnen und war noch durch den breiten Tethys-Ozean, der inzwischen zum Mittelmeer geschrumpft ist, mit dem Pazifik verbunden. Das Kreidebecken von Tarfaya lag zu dieser Zeit auf dem Schelf des weit gefluteten Kontinentalrandes vor Nordwestafrika. Die Ablagerung von Schwarzschiefern war damals ein weit verbreitetes Phänomen im Ozean.

Diese Untersuchungen sind eingebunden in das Cenomanian-Turonian Network Program, eine europäische Forschungsinitiative, an der sich sieben Forschungsinstitutionen aus Italien (Mailand), den Niederlanden (Texel), England (Oxford, Newcastle) und Deutschland (Oldenburg, Bremen, Kiel) beteiligen. Zum Vergleich der Sedimentationsdynamik in diesem küstennahen Ablagerungsraum mit derjenigen im angrenzenden Nordatlantik und der Tethys werden ▷

▷ auch Tiefseebohrkerne des Ocean Drilling Program (ODP) und seines Vorläufers, des Deep Sea Drilling Projects (DSDP), sowie Ablagerungen in Italien und England einbezogen.

Leider war die Region von Tarfaya am westlichen Rand der Sahara wegen eines schwelenden Bürgerkriegs zwei Jahrzehnte lang nicht zugänglich. Erst eine Entspannung der politischen Lage machte es möglich, ab 1997 Landexpeditionen durchzuführen. Schon in den 1970er und frühen 1980er Jahren hatten marokkanische und europäische Ölfirmen (Onarep und Shell) auf der Suche nach dem flüssigen Gold ein dichtes Raster von rund 80 Bohrungen über das Tarfaya-Becken gelegt. Ihr umfangreiches Kernlager und ihre Datenarchive blieben jedoch viele Jahre unter Verschluss. Die Öffnung fiel etwa mit dem Zeitpunkt zusammen, als auch das Gelände wieder zugänglich wurde, sodass heute auf bereits vorliegende Daten und neues Kernmaterial zurückgegriffen werden kann.

Die Schwarzschiefer-Abfolgen im Tarfaya-Becken zeichnen sich nicht nur durch ihre große Mächtigkeit aus, sondern sind vor allem auch hervorragend erhalten. An der Wende vom Cenoman zum Turon wurden in diesem Schelfbereich im Durchschnitt elf Gramm organischer Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr deponiert; das sind die höchsten bekannten Einbettungsraten weltweit (Bild unten). Dadurch kann man mit entsprechend feinen Untersuchungsmethoden eine zeitliche Auflösung von weniger als hundert Jahren erreichen und selbst noch äußerst kurzfristige Variationen im Sedimentationsgeschehen erfassen.

Diese kommen in der Feinschichtung zum Ausdruck. Der Wechsel zwischen helleren, stärker kalkigen und dunkleren, organikreicheren Lagen, der sich im Millimeter- bis Zentimeterbereich abspielt, könnte Variationen der Umweltbedingungen im Zeitrahmen von Jahrzehnten widerspiegeln. In unserer heutigen Welt verbinden wir eine solche Frequenz mit dem elfjährigen Sonnenfleckenzyklus. Bedeutet das vielleicht, dass die Umwelt- und Ablagerungsbedingungen vor 94 Millionen Jahren durch eine vergleichbare Variation in der Sonnenintensität moduliert wurden?

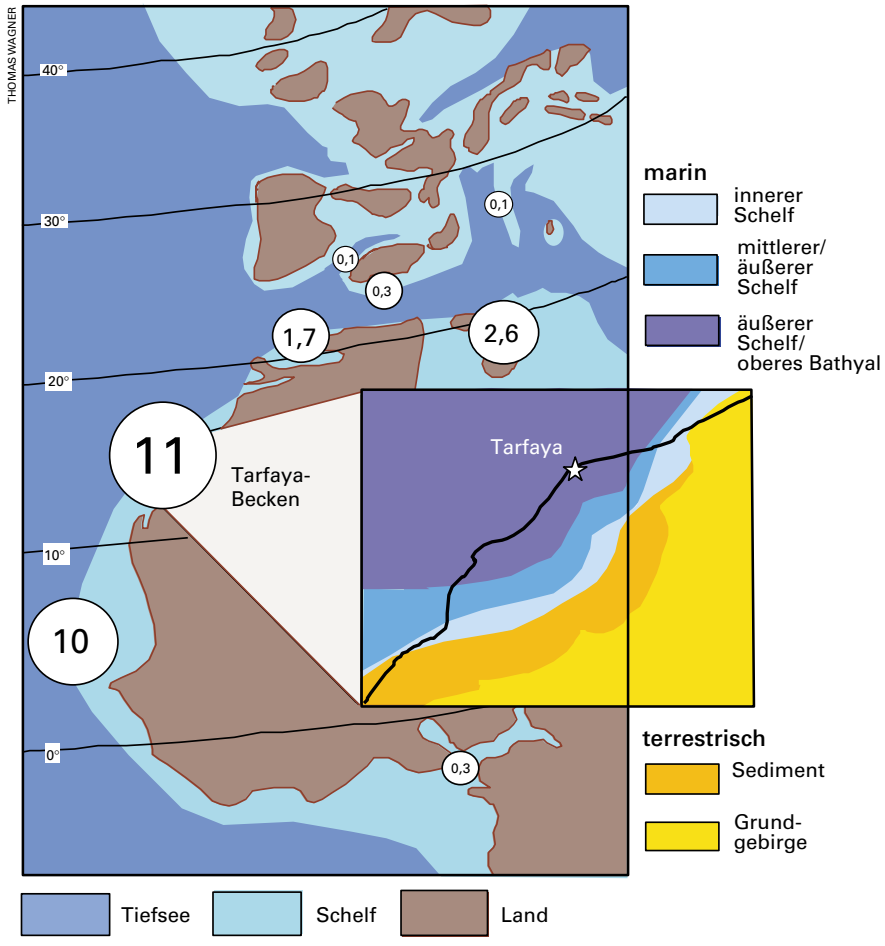
Eine definitive Antwort auf diese spannende Frage lässt sich noch nicht geben, weil dazu die unabhängige Bestätigung durch gleichartige Befunde an anderen Stellen nötig wäre; in der Regel ist aber die Genauigkeit der Zeitabschätzung in so alten Meeressedimenten dafür viel zu schlecht. Es wird daher schwierig sein, einen endgültigen Beweis für den vorgeschlagenen Mechanismus zu liefern. Dennoch zeigen die Überlegungen zur Entstehung der Lamination in Schwarzschiefern, in welche zeitliche Dimension die heutige Kreideforschung bereits vorgedrungen ist.

Aufschlussreiche Zyklen im Meterbereich

Eine klare und zugleich hochinteressante Parallele zur heutigen Klimadynamik manifestiert sich dagegen in den ausgeprägten Zyklen, die in den Sedimentabfolgen von Tarfaya im Meterbereich auftreten. Sie bestehen in einem Wechsel zwischen hellen, karbonatreichen Bänken und dunklen, organikreichen Schwarzschiefern. Im selben Rhythmus variieren physikalische Eigenschaften des Gesteins wie die Dichte mit der Tiefe (Kasten rechts), was eine präzise Korrelation der Einzelprofile über weite Distanzen erlaubt. Welche Zeitskala steckt in diesen Zyklen? Mathematischen Analysen zufolge entsprechen sie den periodischen Schwankungen, denen das Klima unserer Eishauswelt unterliegt. Wie aber kann das sein, wenn es damals gar kein Eis gab?

Den Grund für den heutigen Wechsel zwischen langen frostigen Phasen mit hochgradiger Vereisung in hohen Breiten und relativ warmen Zwischenperioden – in einem solchen Interglazial leben wir gerade – entdeckte der Serbe Milutin Milanković schon vor der Mitte des 20. Jahrhunderts. Demnach sorgen Variationen in den Bahnparametern der Erde für eine zyklisch wechselnde Sonneneinstrahlung.

Ablagerungsraten von organischem Kohlenstoff



Am afrikanischen und europäischen Kontinentalrand sammelten sich zur Zeit des Cenoman-Turon-Übergangs große Mengen an organischem Kohlenstoff am Meeresboden an. Hier sind für verschiedene Orte die Akkumulationsraten in Gramm pro Quadratmeter und Jahr eingetragen. Die weltweit höchsten Werte wurden im Becken von Tarfaya erreicht.

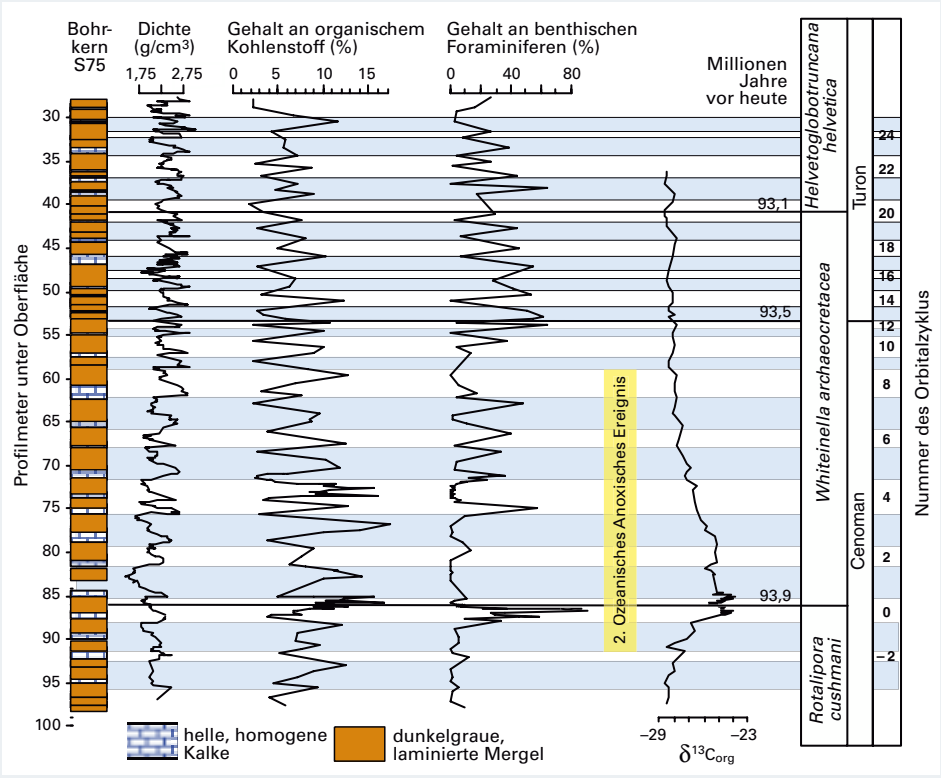
Ablagerung im Rhythmus der Erdbahnschwankung

In den Sedimenten von Tarfaya wechseln helle, kalkige Schichten mit dunkleren Lagen ab. Im gleichen Rhythmus variieren Eigenschaften des Gesteins, die unter anderem am Bohrkern S75 aus dem zentralen Bereich des Tarfaya-Beckens gemessen wurden – insbesondere die Dichte und der Gehalt an organischem Kohlenstoff sowie der Anteil benthischer (bodenlebender) Foraminiferen am Gesamtbestand der kalkschaligen Einzeller.

Um die Periode dieser Fluktuationen zu bestimmen, gingen die Autoren von der gut gesicherten Annahme aus, dass das zweite Ozeanische Anoxische Ereignis rund 400 000 Jahre dauerte. Seinen Beginn identifizierten sie mit dem steilen Abfall im Anteil des Isotops der Masse 13 im abgelagerten organischen Kohlenstoff, der mit dem Wechsel von *R. cushmani* zu *W. archaeocretacea* einhergeht. Das Ende wurde nahe der Grenze zwischen den Kreidestufen Cenoman und Turon festgelegt.

Zwischen diesen beiden Fixpunkten liegen zehn zyklische Schwankungen der Gesteinsdichte und der anderen Eigenschaften. Damit ergibt sich für die Zeitdauer eines Zyklus ein Wert von etwa 40 000 Jahren. Das stimmt recht gut mit der Periode eines Erdbahnparameters überein, der während der letzten Jahrmillionen mit ihrem Wechsel aus Eis- und Warmzeiten das irdische Klima entscheidend beeinflusst hat: der Neigung der Erdachse (Erdschiefe), die im Rhythmus von 41 000 Jahren variiert (in der Kreidezeit waren es 39 000 Jahre). Demnach bestimmte dieser orbitale Faktor anscheinend schon vor 94 Millionen Jahren die Ablagerungsbedingungen im Becken von Tarfaya.

Die Schwankungen oberhalb des achten Zyklus haben eine kürzere Periode von etwa 20 000 Jahren und lassen sich deshalb einem anderen Erdbahnparameter zuordnen: der Wanderung des Perihels (sonnennächsten Punktes), der je nach Erdschiefe entweder 19 000 oder 21 000 Jahre braucht, bis er wieder auf dasselbe Datum im Jahreskreislauf – etwa Neujahr – fällt.



strahlung an der Oberfläche der Atmosphäre (Insolation) und bilden so den Motor für schnelle Klimavariationen. Diese Parameter und ihre Schwankungsperioden sind: die Exzentrizität der Erdbahn (100 000 Jahre), die Neigung der Erdachse oder Erdschiefe (41 000 Jahre) und der Zeitpunkt des Perihels oder sonnennächsten Punktes (19 000 oder 21 000 Jahre).

Auch die Sedimente von Tarfaya zeichnen im Meterbereich den Gang der von Milanković entdeckten Bahnparameter nach: Offenbar veränderten regelmäßige Schwankungen in der Insolation die Umweltbedingungen derart, dass im zyklischen Wechsel organikreiche Schwarzschiefer und karbonatreiche Zwischenlagen gebildet wurden. Offenbar besteht dabei eine besonders starke Korrelation mit der Erdschiefe, die in der Oberkreide mit einer Periode von 39 000 Jahren variierte. In den untersuchten Profilen von Tarfaya sind zwölf solche Erdschiefezyklen erkennbar (zehn davon lassen sich dem zweiten Ozeanischen Anoxischen Ereignis zuordnen), gefolgt von 15 Periheldrehungszyklen mit einer Periode von jeweils ungefähr 20 000 Jahren. Insgesamt ergibt das einen Zeitraum von rund 770 000 Jahren (Kasten oben). Innerhalb der Zyklen variiert auch der Anteil an Foraminiferen, die benthisch, also am Meeresboden leben – ebenso die Gesamtmenge des organischen Kohlenstoffs.

Dabei sind die Fluktuation im Gehalt an organischen Kohlenstoff und im Anteil an benthischen Foraminiferen in der Regel gegenläufig. Das spricht für einen zyklischen Wechsel in der Sauerstoffversorgung des Beckens: Hohe Kohlenstoffgehalte und wenig bodenlebende Tiere zeigen sauerstoffarme Phasen an, während das Vorkommen benthischer Foraminiferen und niedrige Kohlenstoffgehalte günstigere Lebensbedingungen erkennen lassen.

Die Beobachtung von Milanković-Zyklen in der Oberkreide ermöglicht aber noch weitere Analogieschlüsse auf das damalige Klima. In der jüngeren Vergangenheit haben die erdbahngesteuerten Schwankungen der Sonneneinstrahlung unter anderem die Intensität des Passatwind-Systems beeinflusst: Die durchschnittliche Windstärke erhöhte sich in den trockenen Eiszeiten (Glazia- ▷

len), während sie in den humiden Interglazialen zurückging. Da ablandige Passatwinde den Auftrieb von nährstoffreichen Wassermassen am westlichen Kontinentalrand förderten, schlug sich ihre wechselnde Stärke in einer zyklischen Abfolge von organikreichen und -armen Sedimenten vor Nordwestafrika nieder.

Derselbe Rhythmus in den Kreideschichten von Tarfaya legt folglich nahe, dass schon vor 94 Millionen Jahren dieser Mechanismus eines von ablandigen Passatwinden verursachten Auftriebs vor Nordwestafrika wirksam war. In Phasen mit starkem Auftrieb erhöhte sich die biologische Produktivität im küstennahen Atlantik, und es bildeten sich organikreiche Schichten. Karbonatreiche Lagen entstanden dagegen in weniger windigen Perioden. Aktuelle Klimasimulationen am Geomar in Kiel bestätigen drastische Wechsel zwischen ariden und humiden Klimaperioden in Zentral- und Nordafrika während der Oberkreide und stützen damit die Interpretation aus den Sedimenten.

Die Gliederung der Profile von Tarfaya nach Milanković-Zyklen erlaubt auch eine sehr genaue zeitliche Einstufung. In Kombination mit anderen stratigrafischen Informationen aus dem Bereich der Paläontologie und Isotopenchemie ergibt sich so für die Mittelkreide ein präzises Altersmodell, mit dem sich nun jeder Abschnitt der Klimaentwicklung exakt datieren lässt. Demnach dauerte der rapide Entzug von Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu Beginn der Schwarzschiefer-Ablagerung in Tarfaya höchstens 60 000 Jahre. Nach zögerlichem Beginn erreichte er in einer zweiten Phase seine maximale Geschwindigkeit. In den nachfolgenden 340 000 Jahren blieb der Gehalt der Atmosphäre an dem Treibhausgas annähernd konstant, bevor er wieder langsam auf den Ausgangswert anstieg. Insgesamt umfasste das zweite Ozeanische Anoxische Ereignis an der Wende vom Cenoman zum Turon nur etwa 400 000 Jahre, was geologisch ein sehr kurzer Zeitraum ist.

Außer den Erdbahnzyklen wurden unlängst auch kurzfristigere Schwankungen entdeckt, die weitere Rätsel aufgeben. Mit einem neuartigen, voll automatisierten Röntgenfluoreszenzscanner an der Universität Bremen maßen Wissenschaftler Konzentrationsprofile der Elemente Silizium, Eisen, Titan und Kalzium. Die Auflösung betrug fünf Millimeter, was rund 50 Jahren entspricht. Dabei zeigten sich unter anderem Variationen mit einer Frequenz von 3000 bis 4000 Jahren. Ähnliche zyklische Schwankungen waren auch in hochauflösenden organischen Kohlenstoffprofilen erkennbar. Was hat sie verursacht?

Mahnendes Menetekel aus der Zeit der Dinosaurier

In der jüngsten Vergangenheit entsprechen derart hochfrequente Klimavariationen den so genannten Dansgaard-Oeschger-Zyklen, die mit dem periodischen Abschmelzen von Eismassen in den hohen nördlichen Breiten erklärt werden (Spektrum der Wissenschaft 9/2001, S. 12). Während des Cenoman-Turon-Übergangs gab es nach derzeitigem Wissen jedoch nirgendwo auf der Erde großflächige Gletscher – auch an den Polen nicht. Was die beobachteten Schwankungen antrieb, ist also völlig unklar. Nur durch weitere, hochauflösende Untersuchungen an anderen Sedimentschichten aus jener Zeit kann man Aufschluss über ihre Ursache erhoffen.

Obwohl somit weiterhin viele Fragen offen sind, hat sich unser Verständnis der Klimadynamik in der Oberkreide dank der jüngsten Forschungen – insbesondere an den Schwarzschiefer-Ablagerungen im Tarfaya-Becken – doch deutlich vertieft. Wir kennen nun das Ausmaß und den zeitlichen Verlauf der Temperatur- und Umweltschwankungen sehr viel genauer und haben ein konsistentes Bild darüber gewonnen, wie die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Treibhauseffekt, meteorologischen Verhältnissen, Meeresströmungen und mariner biologischer Produktivität mehrfach in weiten Bereichen der Ozeane extrem lebensfeindliche Bedingungen schufen. Interessant ist dabei, dass der von Milanković postulierte Einfluss der Erdbahnparameter auf das irdische Klima offenbar auch unter abweichenden plattentektonischen Konstellationen und in einer extremen Treibhauswelt wirksam war, wobei er zu drastischen Änderungen im Sedimentationsgeschehen geführt hat.

Was können wir aus den Erkenntnissen über das globale Dampfbad der Kreidezeit für die Entwicklung unseres heutigen Klimas ableiten? Unmittelbare Vergleiche und einfache Schlussfolgerungen sind zwar kaum möglich, weil sich mehrere wichtige Rahmenbedingungen wie die Konfiguration der Kontinente und das damit verbundene Muster der globalen Zirkulation im Ozean und in der Atmosphäre grundlegend geändert haben. Generell bestätigt sich aber der enorme Einfluss des Kohlendioxids und anderer Treibhausgase auf das Klima und die Umwelt. Dabei war die schwülheiße Saunawelt des Cenoman-Turon offenbar hochgradig instabil und durch rasch wechselnde, extreme Umweltzustände gekennzeichnet.

Bei weiterem Temperaturanstieg auf Grund des anthropogenen Treibhauseffekts werden voraussichtlich gleichfalls extreme Klimasituationen zunehmen – mit unterschiedlichen Auswirkungen je nach geografischer Lage. Erste Anzeichen dafür könnten das vermehrte Auftreten von schweren Stürmen und Überschwemmungen in Nordwesteuropa oder die Intensivierung des Monsunsystems mit katastrophalen Hochwassern in den Tropen sein. Wie der Blick zurück in die Kreidezeit zeigt, drohen aber noch weitaus unliebsamere Überraschungen. Auch wenn ein sauerstofffreier Ozean sicher nicht so bald zu erwarten ist, erscheint er als fernes, mahnendes Menetekel aus der Zeit der Dinosaurier.

Thomas Wagner (links) ist Privatdozent im Bereich Sedimentologie/Paläoozeanografie an der Universität Bremen. Er hat an der Universität Heidelberg Chemie und Geologie studiert und 1993 an der Universität Kiel promoviert. **Wolfgang Kuhnt** (Mitte) lehrt an der Universität Kiel Mikropaläontologie und ist Direktor am Institut für Geowissenschaften. **Jaap S. Sinninghe Damsté** leitet am Königlichen Niederländischen Institut für Meeresforschung (NIOZ) auf Texel die Abteilung Marine Biogeochemie und Toxikologie.

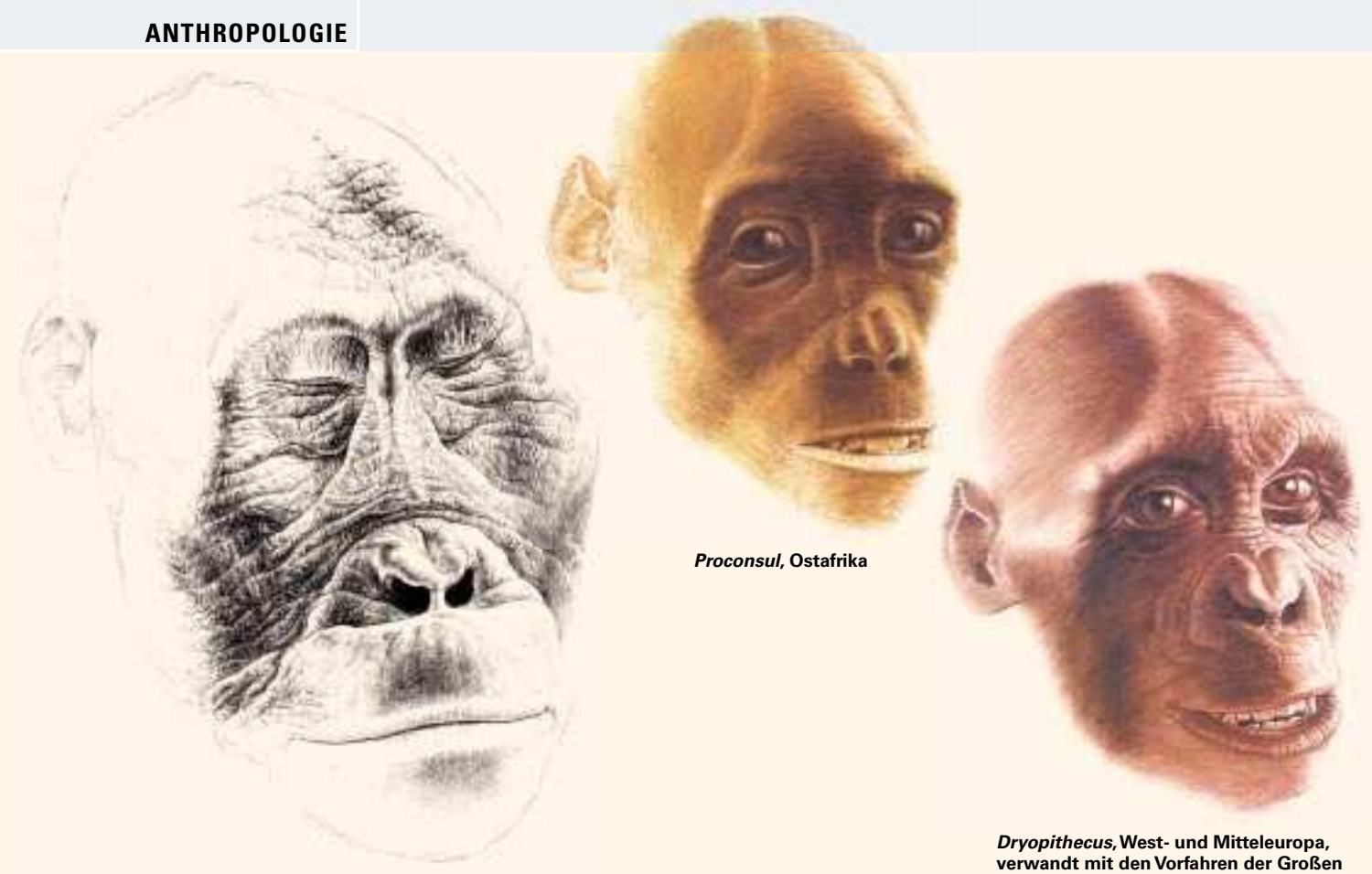
AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Klimafakten: Der Rückblick – ein Schlüssel für die Zukunft. Von U. Berner und H.-J. Streif. Schweizerbart´sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 2001.

Centennial Record of Cretaceous Paleoceanographic Events and Sealevel Fluctuations in the Moroccan Tarfaya-Laayoune Basin. Von W. Kuhnt et al. in: EOS Transactions, Bd. 82, Nr. 33, S. 361, 14.8.2001.

A Large and Abrupt Fall in Atmospheric CO_2 Concentration during Cretaceous Times. Von M. M. M. Kuypers, R. Pancost und J. S. Sinninghe Damsté in: Nature, Bd. 399, S. 342 (1999).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Sivapithecus, Südasien

Proconsul, Ostafrika

Dryopithecus, West- und Mitteleuropa, verwandt mit den Vorfahren der Großen afrikanischen Menschenaffen

Das Zeitalter der Menschenaffen

In Eurasien – nicht in Afrika – stand die Wiege der Hominiden. Genauer: Dort entstanden die Großen Menschenaffen, aus denen später in Afrika der Mensch hervorging.

Von David R. Begun

Charles Darwin (1809–1882) vermutete schon, dass der Mensch von menschenaffenähnlichen Wesen abstammte. Nach seiner Überlegung lebten diese Urahnen am wahrscheinlichsten in Afrika. Denn die uns ähnlichsten unter den heutigen Affen seien die afrikanischen Menschenaffen Gorilla und Schimpanse. Zu Darwins Zeit kannten Anthropologen weder afrikanische Fossilien von Vor- und Frühmenschen noch deren Primatenvorfahren.

Was der Entdecker der heute gültigen Evolutionstheorie über unsere Herkunft schrieb, konnten Paläontologen dennoch im Verlauf des 20. Jahrhunderts weitgehend bestätigen. Außer vielen Fossilien sprechen inzwischen auch genetische Untersuchungen dafür, dass der letzte gemeinsame Vorfahre von Mensch und Schimpanse vor etwa 6 bis 8 Millionen Jahren in Afrika lebte. Fragt man jedoch, woher wiederum diese Linie stammte, wird das Bild komplexer. Eine Zeit lang glaubten Paläoanthropologen, auch diese längst verschwundenen Primaten seien afrikanischen Ursprungs gewesen. Eine Vielzahl neuerer Fossilien verweist aber inzwischen nach Eurasien. Zwar sind die Menschenaffen in Afrika entstanden, sie hatten dann aber in Eurasien die so genannten Großen Menschenaffen hervorgebracht.

***Oreopithecus,* Italien**

***Ouranopithecus,* Griechenland**

Die Gesichter der fossilen Menschenaffen rekonstruierte John Gurche (siehe zu dem Verfahren auch www.sciam.com/ontheweb, August).

Die Blütezeit der Menschenaffen herrschte im Miozän. Damals besiedelten diese Primaten mit einer Vielzahl von Arten die Alte Welt. Einer der ersten Vertreter war die afrikanische Gattung *Proconsul*. Deren Nachfahren eroberten Eurasien. Dort bildeten sie bald viele Linien und brachten die Großen Menschenaffen – Hominiden – hervor, darunter *Dryopithecus* und *Ouranopithecus*. Einer von beiden war vermutlich ein Urahn des Menschen. Diese Zeichnungen entstanden anhand von Knochenfossilien nach gerichtsmedizinischen Verfahren.

Heute leben in letzten Refugien nur noch wenige Menschenaffenarten. Doch im Miozän, der Epoche vor 22 bis 5,5 Millionen Jahren, existierten rund hundert Arten. Sie waren die vorherrschenden Primaten und müssen weite Gebiete der Alten Welt bevölkert haben. Paläontologen finden ihre Fossilien quer durch Eurasien von Frankreich bis China und in Afrika von Kenia bis Namibia.

Hinsichtlich der menschlichen Evolution interessieren besonders die Großen Menschenaffen. Zu ihnen gehören die afrikanischen Arten Schimpanse, Bonobo (Zwergschimpanse) und Gorilla sowie der in Südostasien beheimatete Orang-Utan. Die Gibbons, die ebenso in Südostasien lebenden Kleinen Menschenaffen, sind mit dem Menschen entfernter verwandt. Fossilien von Großen Menschenaffen fanden sich bisher nur in Eurasien – in West-, Mittel- und Südeuropa, in der Türkei, in Südasien und in China. In Afrika sind bisher keine solchen Überreste aufgetaucht. Angesichts dessen hätte Darwin sicherlich angenommen, dass die Primatenfamilie, die Mensch und Große Menschenaffen umfasst, also die Hominiden, in Eurasien entstand.

Nachträglich mag das Ursprungsgebiet der Hominiden nicht sonderlich überraschen. Eurasien dürfte im Miozän ein ideales Experimentierfeld für diese Evolution geboten haben. In einem Ausmaß wie seither nie wieder ereigneten sich damals Wanderungen von Primatengruppen, Klimawechsel, tektonische Verwerfungen und ökologischer Wandel. Unter diesen Bedingungen entstand eine Vielfalt von Menschenaffen. Von denen konnten zwei Linien Großer Menschenaffen später einerseits Südostasien, andererseits Afrika besiedeln.

Diese Entwicklung werde ich hier in großen Zügen darstellen. Nach einem kurzen Abriss der Forschungsgeschichte der letzten beiden Jahrhunderte beschreibe ich zunächst die frühen Menschenaffen vom Anfang des Miozäns in Afrika. Zu ihnen gehörte *Proconsul*, der sie gut repräsentiert. Dann erzähle ich, wie in Eurasien aus einer der afrikanischen Linien die Großen Menschenaffen hervorgingen. Zuletzt komme ich auf die menschliche Evolution zu sprechen.

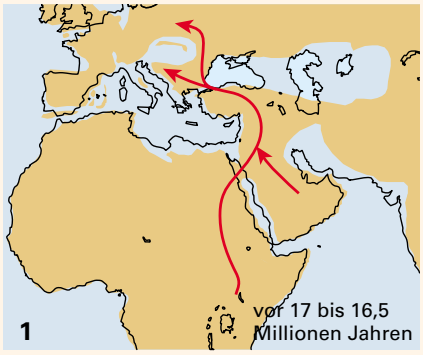
Im Jahr 1812 behauptete der französische Naturforscher Georges Cuvier (1769–1832), der Begründer der Paläontologie, einen fossilen Menschen gebe es nicht, ebenso wenig fossile Primaten. ▷

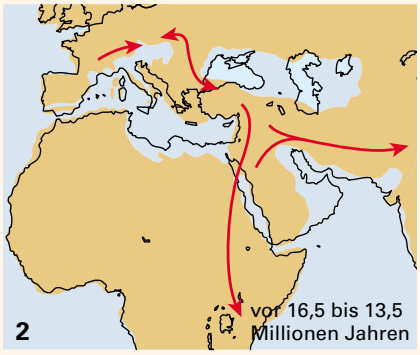
IN KÜRZE

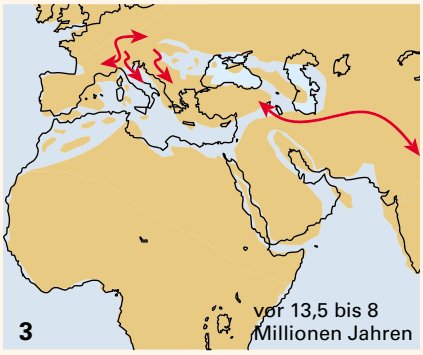
- Im **Miozän**, vor 22 bis 5,5 Millionen Jahren, lebten rund hundert Arten von Menschenaffen. Heute gibt es nur noch fünf.
- Ursprünglich entstanden die Menschenaffen zwar in Afrika. Doch die Linie der **Großen Menschenaffen**, von der auch der Mensch abstammt, entwickelte sich offenbar in Eurasien.
- Wahrscheinlich stammt der Orang-Utan von einer alten eurasischen Linie ab, zu der *Sivapithecus* gehörte. **Vorfahr der afrikanischen Menschenaffen und des Menschen** dürfte die Verwandtschaftsgruppe von *Dryopithecus* gewesen sein.

Afrika – Eurasien und zurück

Zwischenstation Eurasien. Die Menschenaffen entstanden vor über 20 Millionen Jahren, am Anfang des Miozäns, in Afrika. Schon bald gelangten sie über eine damals bestehende Verbindung nach Eurasien (1), wo sie sich weit ausbreiteten und unter anderem die Großen Menschenaffen hervorbrachten. Ein paar ursprünglichere Menschenaffenarten zogen bald wieder nach Afrika (2). Später waren die frühen Großen Menschenaffen Eurasiens von Afrika abgeschnitten. Damals verzweigten sie sich stark (3). Die meisten dieser Linien starben aus, als sich das Klima am Endes des Miozäns drastisch







▷ Tatsächlich sammelten die Wissenschaftler damals zwar Knochen von Mastodonten und anderen ausgestorbenen Tieren. Doch kannten sie noch keine Fossilien von Primaten aus vergangenen Zeitaltern. Was Cuvier nicht wusste: Er selbst hatte einen Lemuren aus den Kalksteinbrüchen von Paris beschrieben. Er nannte das Tier *Adapis parisiensis*, hielt es aber für ein primitives Huftier.

Dryopithecus: erster Fund unseres mutmaßlichen Urahnen

Das erste Fossil eines gleich richtig klassifizierten höheren Primaten beschrieb Cuviers Schüler Édouard Lartet (1801–1871) im Jahr 1837. Diesen Affen, von dem sich in Südostfrankreich ein Kieferknochen fand, nennt die Fachwelt heute *Pliopithecus*. Anhand dieses Fundes und anderer erkannten Wissenschaftler, dass die Wälder Europas einmal von Primaten bewohnt gewesen sein müssen. Den ersten fossilen Großen Menschenaffen, *Dryopithecus*, klassifizierte Lartet fast zwanzig Jahre später. Das Fossil stammte aus den französischen Pyrenäen.

In den folgenden Jahrzehnten bargen Paläontologen vielerorts Überreste von früheren Menschenaffen: in Spanien, Frankreich, Deutschland, Österreich, der Slowakei, Ungarn, Georgien und in der Türkei. Außer zahlreichen Kieferfragmenten und Zähnen entdeckten sie auch ein paar Knochen von Gliedmaßen. In den 1920er Jahren allerdings lenkten Aufsehen erregende Funde das Augenmerk der Forscher nach Südasien – nach Indien und Pakistan – und nach Afrika, insbesondere nach Kenia. Die früheren Entdeckungen gerieten weitgehend in Vergessenheit.

Entdeckungen in den letzten zwanzig Jahren entfachten erneut Interesse an den Menschenaffen des westlichen Eurasien. Manche dieser Fossilien sind vollständig genug, um sich ein Bild zu machen, wie diese Primaten aussahen. Das erlaubt auch Rückschlüsse auf ihre Verwandtschaft mit den heutigen Menschenaffen und dem Menschen.

Bisher kennen Wissenschaftler von Afrika und Eurasien aus dem Miozän vierzig Gattungen von Menschenaffen, von manchen davon mehrere Arten. Im frühen Miozän, in der Phase vor 22 bis 17 Millionen Jahren, lebten in ihrer ursprünglichen Heimat Afrika nach heutiger Kenntnis 14 Gattungen. Weil Fossilfunde stets lückenhaft sind, dürften es noch deutlich mehr gewesen sein. Offenbar war Vielfalt für die Menschenaffen von Anfang an typisch. Kaum erscheinen sie in Afrika in den Fossilschichten, treten sie in mehreren Arten auf. Schon im frühen Miozän variierten sie stark in der Größe. Manche wogen kaum drei Kilogramm, wenig mehr als eine Hauskatze. Die größten Arten reichten mit achtzig Kilogramm fast an Gorillas heran. Ihre Ernährung war noch breiter gefächert als die ihrer überlebenden Verwandten. Die meisten fraßen vorwiegend reifes Obst. Einige hatten sich auf Blätter spezialisiert, andere auf Früchte und Nüsse.

Am meisten unterscheiden sich jene ersten Menschenaffen von den heutigen in Körperhaltung und Fortbewegungsweise. Die modernen Arten beherrschen ganz unterschiedliche Lokomotionsformen, vom weit ausgreifenden Schwinghangeln der Gibbons bis zum Knöchelgang des Gorillas auf dem Boden. Dagegen kletterten die frühen Menschenaffen vierfüßig auf den Ästen, waren in ihren Möglichkeiten also recht eingeschränkt.

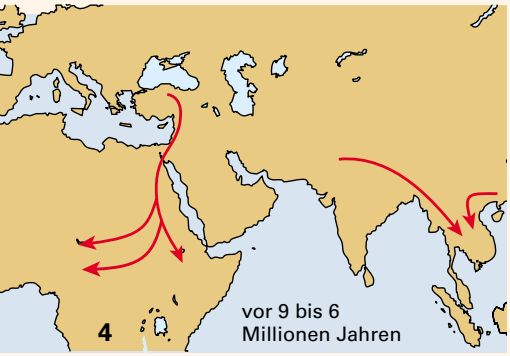
Das hing mit ihrem Körperbau zusammen. Am bekanntesten ist die Gattung *Proconsul*, von der Paläontologen bemerkenswert vollständige Fossilien auf der kenianischen Halbinsel Rusinga im Nyanza-See, dem früheren Viktoriasee, fanden (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/1989, S. 102). Momentan unterscheiden die Wissenschaftler vier *Proconsul*-Arten. Die kleinste wog zehn, die größte möglicherweise achtzig Kilogramm.

Proconsul vermittelt einen guten Eindruck davon, wie diese Affen gebaut

GLOSSAR

- **Hominiden:** nach neuerer Auffassung Große Menschenaffen (Orang-Utan, Gorilla, Schimpanse, Bonobo) und Mensch
- **Kleine Menschenaffen:** Gibbons
- **Hominoiden:** Kleine sowie Große Menschenaffen und der Mensch

verschlechterte. Vertreter zweier Linien retteten sich nach Südostasien beziehungsweise ins tropische Afrika (4): im einen Fall die von *Sivapithecus*, im anderen die von *Dryopithecus*.



waren und sich fortbewegten (siehe Kasten Seite 63). Sie besaßen keinen Schwanz mehr. Dafür waren ihre Hüften, Schultern, Hand- und Fußgelenke sowie Hände und Füße bereits beweglicher als bei Tieraffen. Die ausgeprägte Gelenkigkeit der modernen Menschenaffen und des Menschen kündigte sich gewissermaßen schon an. Dank dessen vermögen heutige Menschenaffen auf einzigartige Weise schwungvoll durchs Geäst zu hangeln. Später nutzte der Mensch die hohe Beweglichkeit seiner Hände unter anderem zum Anfertigen von Werkzeugen.

Daneben bewahrten *Proconsul* und seine hominiden Zeitgenossen noch etliche ursprünglichere Merkmale. Wirbelsäule, Becken und Arme glichen in manchem noch stark denen von Tieraffen. Wie ihre äffischen Vorfahren waren die ersten Menschenaffen besser dafür gerüstet, auf Ästen entlangzuklettern, als sich mit den Armen daran zu hängen und vorwärts zu schwingen – die rätselhafte Gattung *Morotopithecus* vielleicht ausgenommen. Viel dieser überkommenen Merkmale mussten die Menschenaffen erst ablegen, bevor sie sich neue Fortbewegungsweisen aneigneten.

Das Gros der frühen afrikanischen Formen starb bald aus. Eine davon muss allerdings Vorläuferin jener Art gewesen sein, die als Erste vor rund 16,5 Millionen Jahren nach Eurasien gelangte (siehe Bild auf dieser Doppelseite oben, ganz links). Vielleicht war dieser Ahne *Afropithecus* aus Kenia. Der sinkende Meeresspiegel schuf damals zur arabischen Halbinsel eine Landbrücke, über die viele Säugetiere nach Eurasien einwanderten, darunter Elefanten, Nagetiere, Schweine und Antilopen sowie ein paar Exoten, etwa Erdferkel, außerdem Primaten.

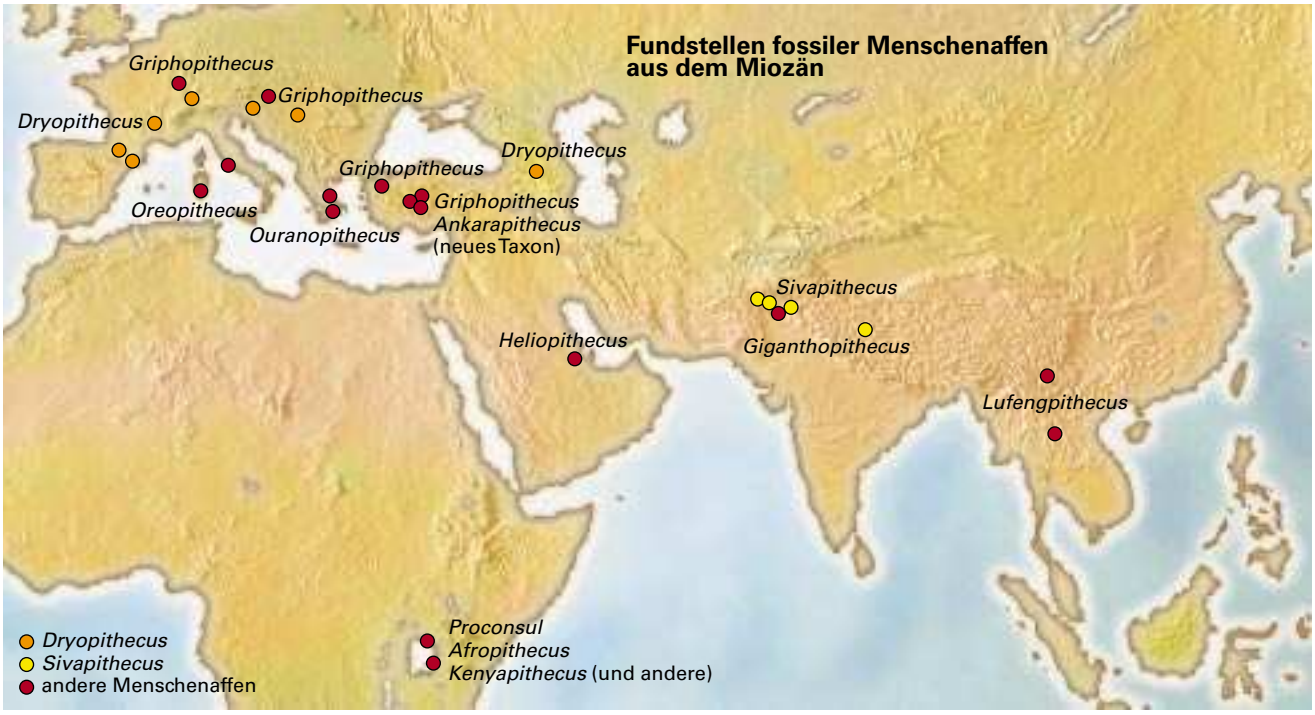
Offenbar durchquerten die Menschenaffen damals Saudi-Arabien. Von dort stammen Fossilien von *Heliopithecus*, der *Afropithecus* so stark ähnelt, dass manche Forscher sie zusammen in eine Gattung stellen. Beide besaßen Zähne mit dicker Schmelzschicht, fraßen also wohl hartes und zähes Futter, etwa Nüsse oder hartschalige Samen. Besonders die kräftigen Zähne könnten ihren Nachfahren erlaubt haben, Eurasien zu erobern. In dessen Wäldern mögen diese Menschenaffen Nahrungsquellen erschlossen haben, die einem *Proconsul* nicht zugänglich gewesen wären. Als die Landverbindung nach Afrika eine halbe Million Jahre später wieder verschwand, hatten sie sich auf die neue Heimat schon gut eingestellt.

Rasche Ausbreitung in Eurasien

Wenn Organismen erstmals in einen neuen Lebensraum vordringen, bringen sie dort oft in kurzer Zeit viele neue Arten hervor. Das scheint auch hier der Fall gewesen zu sein. Binnen nur 1,5 Millionen Jahren, erdgeschichtlich eines Augenblicks, passten die Menschenaffen sich vielfältig an ihre neue Umwelt an und bildeten in Eurasien mindestens acht neue Formen.

Diese lebhafte Entwicklung gab den Hintergrund für die Evolution der Gro- ▷

Eurasien erlebte im Miozän eine Blütezeit der Menschenaffen. Dort entstanden damals die Großen Menschenaffen und damit die Hominiden.



KARTEN AUF DIESER DOPPELSEITE: LAURIE GRACE; QUELLE FÜR DIE LANDKARTE: F. RÖGL IN: THE MIOCENE LAND MAMMALS OF EUROPE VON R. RÖSSNER UND K. HEISSIG, VERLAG DR. FRIEDRICH PFEIL, 1999

ßen Menschenaffen ab. Die besondere Bedeutung Eurasiens auch für die Evolution des Menschen begreifen die Forscher erst jetzt allmählich.

Früher glaubten Paläontologen, erst vor 15 Millionen Jahren hätten Menschenaffen mit kräftigen Kiefern und großen Mahlzähnen, also mit einem weiter entwickelten Gebiss als dem von *Heliopithecus* und *Afropithecus*, Eurasien erreicht. Das wäre etwa der Zeitraum, als solche Formen in Afrika erstmals auftauchten. Dies deckte sich mit der These, dass solche Primaten in Afrika entstanden und sich erst später nach Norden ausbreiteten. Neuere Fossilfunde deuten darauf hin, dass es in Eurasien bereits deutlich früher Menschenaffen mit einem fortschrittlichen Gebiss gab. Meine Kollegen und ich beschrieben 2001 und 2003 *Griphopithecus*. Dieser vergleichsweise moderne Primat ist aus 16,5 Millionen Jahre alten Ablagerungen von Engelswies in Südwestdeutschland und aus der Türkei bekannt. Damit konnten wir den Beginn der eurasischen Geschichte der Menschenaffen um über eine Million Jahre zurückdatieren.

In Afrika lebten so moderne Menschenaffen vor 17 bis 15 Millionen Jahren anscheinend noch nicht. Vielmehr sahen sie zu jener Zeit noch immer so ursprünglich aus wie im frühen Miozän. Nur wenige Gattungen, etwa *Kenyapithecus*, hatten sich vielleicht im Körperbau mehr ans Bodenleben angepasst. Die Evolution neuartiger Schädel- und Gebisszüge scheint demnach von einigen eurasischen Hominoiden ausgegangen zu sein. Erst später, als der Meeresspiegel wieder gesunken war, besiedelten modernere Formen auch Afrika.

Gegen Ende des mittleren Miozäns, vor knapp 13 Millionen Jahren, lebten in Eurasien nachweislich Große Menschenaffen, in Europa der von Lartet entdeckte *Dryopithecus* und in Asien *Sivapithecus*. Wie ihre heutigen Vettern besaßen diese Tiere einen Kauapparat, der sich ideal zum Zerkleinern weicher, reifer Früchte eignete. In den langen, kräftigen Kiefern saßen große Schneidezähne, schaufel-, nicht hauerförmige Eckzähne sowie hohe Vorbacken- und Backenzähne mit relativ einfacher Kaufläche. Ihre verkürzte Schnauze deutet darauf hin, dass Sehen wichtiger wurde als Riechen.

Frühe Intelligenz bei den Menschenaffen

Wie aus der Feinstruktur der Zähne zu schließen ist, wuchsen diese Primaten in der Jugend offenbar ähnlich langsam wie moderne Menschenaffen. Auch sonst mag ihr Leben vergleichbar abgelaufen sein: mit später Geschlechtsreife, langer Lebensdauer, Aufzucht von nur einem Jungen und so fort. Es scheint sogar, dass diese frühen Großen Menschenaffen, würden sie heute leben, ihren modernen Verwandten intellektuell durchaus Paroli bieten könnten. *Dryopithecus* besaß wahrscheinlich ein ebenso großes Gehirn wie ein gleich großer Schimpanse. Von *Sivapithecus* fehlen hierzu leider aussagekräftige Fossilien. Doch da Lebensform und Gehirngröße meist eng zusammenhängen, dürfte er ebenfalls recht intelligent gewesen sein.

Auch der Bau der Gliedmaßen dieser beiden Primaten ähnelte in vielem dem von Großen Menschenaffen. Bedeutend ist vor allem, dass sich ihre Extremitäten sehr gut zum Hangeln eigneten. Dies zeigt besonders das voll streckbare und während des gesamten Bewegungsablaufs den Arm stabilisierende Ellenbogengelenk. Unter den Primaten haben dieses Merkmal einzig die Menschenaffen. Sie können dadurch allein an den Armen, sogar an einem Arm, hängen und sich mit abwechselndem Einsatz beider Arme in Schwüngen durchs Geäst bewegen. Dem Menschen erlaubt diese anatomische Besonderheit, weit und zielgenau zu werfen. Die Gliedmaßen von *Dryopithecus* wiesen etliche weitere Anpassungen an das Hangeln auf, ebenso Hände und Füße, mit denen er vorzüglich greifen konnte. Er scheint sich folglich in ähnlicher Weise wie die lebenden Großen Menschenaffen durch die Bäume bewegt zu haben. ▷

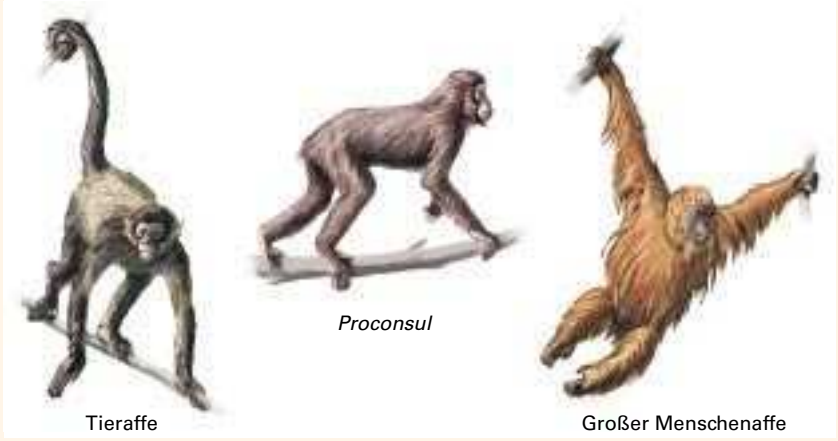
Was sind Menschenaffen?

Worin unterscheiden sich die Menschenaffen von anderen Primaten?

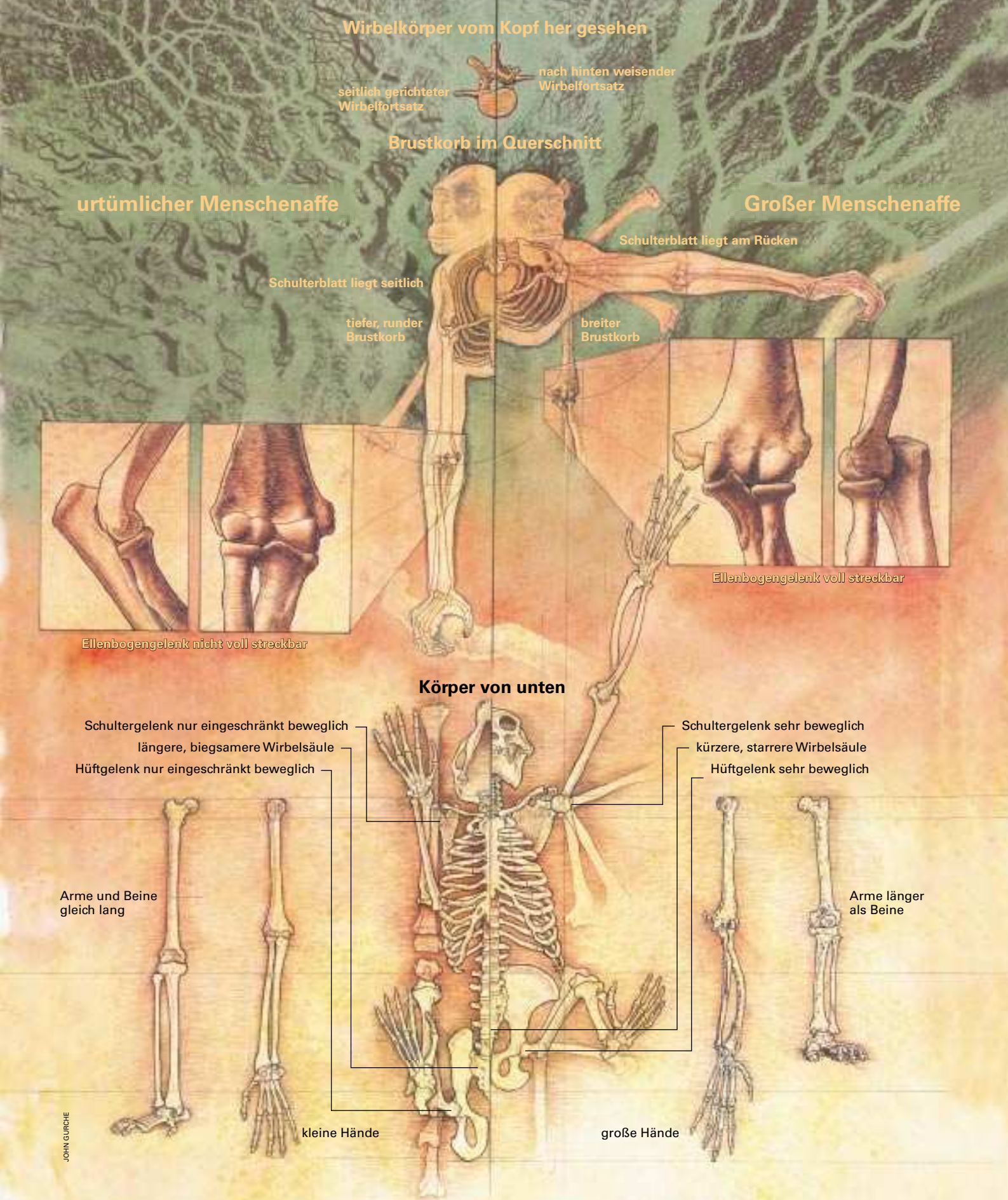
Sie alle haben keinen Schwanz. Rumpf und Gliedmaßen müssen darum neue Aufgaben übernehmen. Also verfügen Mensch und Menschenaffen über besonders gelenkige Gliedmaßen. Sie können die Arme über den Kopf heben und sogar an ihnen baumeln. Alle Menschenaffen besitzen zu diesem Zweck längere und kräftigere Arme als Beine. Beim Menschen verkehrte sich das Verhältnis in Anpassung an den aufrechten Gang.

Wegen der Funktion der Arme besitzen die Menschenaffen auch einen breiten Brustkorb, einen verkürzten Lendenbereich sowie recht bewegliche Hüft- und Fußgelenke und kräftige Greiffüße, und sie halten sich aufrechter als die meisten anderen Primaten. Sie sind außerdem ziemlich groß. Vor allem bei den Großen Menschenaffen dauert das Wachstum viele Jahre, und sie werden spät geschlechtsreif. Nach dem Menschen weisen sie von allen Primaten die größten Gehirne auf. Fast in jeder Hinsicht übertreffen sie sämtliche anderen Säugetiere an Intelligenz.

Proconsul gilt als der erste unstrittige Menschenaffe. Er lebte vor 19 Millionen Jahren in Afrika. Er besaß offensichtlich keinen Schwanz mehr, wie an der unteren Wirbelsäule erkennbar ist. Allerdings hatte er noch ein relativ kleines Gehirn und war in den Gelenken nicht so beweglich wie die modernen Arten.



PORTIA SLOAN



Urtümliche (Frühe) und Große Menschenaffen im Vergleich

Die ersten Menschenaffen hatten noch den Körper eines Tieraffen. Sie waren daran angepasst, über Äste zu laufen. Ihre Wirbelsäule war sehr biegsam und im unteren Teil recht lang. Sie konnten kraftvoll und sehr schnell auf allen vieren klettern.

Große Menschenaffen hingegen sind ans Hangeln angepasst. Sie besitzen weniger Wirbel und eine starrere Wirbelsäule, die hilft, den Körper aufrechter zu halten. Ihre Gliedmaßen sind äußerst beweglich und die Hände sehr groß und kräftig.

Der Yeti – Mythos und Wirklichkeit

Auch einige ernsthafte Wissenschaftler glauben, dass *Sivapithecus* außer dem Orang-Utan noch einen weiteren lebenden Nachfahren hat, einen zottigen, aufrecht gehenden nichtmenschlichen Primaten von riesiger Statur, den Leute an verschiedenen Orten Zentralasiens und Nordamerikas gesehen haben wollen. Seine Namen – wie Yeti, Schneemensch, Bigfoot, Raksi-Bombo – sind so zahlreich wie die Beweise rar.

BETTMANN / CORBIS

Dieser Riesenfußabdruck wurde 1976 an der Pazifikküste des US-Bundesstaates Oregon nahe der Coos Bay fotografiert.

Anhänger des Yetis verweisen auf irgendwelche Haare, Kotreste, Fußabdrücke, verschwommene Fotos oder Videoaufnahmen. Meist nennen sie *Gigantopithecus* als seinen nächsten Vorfahren. Dieser Menschenaffe von der doppelten bis dreifachen Größe eines Gorillas lebte, soweit bekannt, bis vor etwa 300 000 Jahren in China und Südostasien.

Tatsächlich könnte solch ein Koloss durchaus immer noch irgendwo sein Dasein fristen. Stutzig macht aber, dass Menschenaffen, die vor 20 Millionen Jahren auftraten und nicht größer als Kleinkatzen waren, Fossilien hinterließen. Vom Yeti aber existiert bisher nicht ein einziger Knochen, obwohl das Monster eine halbe Tonne wiegen müsste. Wohl jeder von uns Forschern würde liebend gerne einen lebendigen Schneemenschen zu Gesicht bekommen. Hoffnung darf er sich kaum machen.

▷ Die Fortbewegungsart von *Sivapithecus* ist nicht so klar. Neben Anzeichen für Hangeln gibt es auch solche für einen vierfüßigen Gang. Höchstwahrscheinlich besaß dieser Primat eine eigene Art der Lokomotion, für die es unter den heutigen Formen kein Beispiel gibt. Seine Linie war in Asien sehr verbreitet. Sie bildete Abzweige in der Türkei, in Pakistan, Indien, Nepal, China und Südostasien. Von *Sivapithecus* stammt nach vorherrschender Auffassung der Orang-Utan ab. Der »Waldmensch« der Regenwälder Borneos und Sumatras wäre somit der einzige lebende Nachfahre dieser erfolgreichen Gruppe.

Im westlichen Eurasien spielte sich eine ähnlich reiche Artenbildung ab. Die früheste Art dieser Gattung war *Dryopithecus fontani*, den Lartet beschrieben hatte. Innerhalb von etwa 3 Millionen Jahren tauchten mehrere weitere Arten auf. Bald folgten auch stärker spezialisierte Formen. In 2 Millionen Jahren bildeten sich von Nordwestspanien bis nach Georgien vier neue *Dryopithecus*-Arten heraus.

Umstritten ist allerdings die systematische Stellung von *Dryopithecus* innerhalb der Hominoiden. Manche Forscher halten ihn für einen Verwandten der asiatischen Menschenaffen. Andere bezeichnen ihn als den Urahn aller heutigen Großen Menschenaffen. Nach meinen eigenen Untersuchungen – die wohl die meisten Merkmale einbeziehen – dürfte *Dryopithecus* am nächsten mit *Ouranopithecus* verwandt sein, einem Primaten aus Griechenland. Einer von beiden ist wahrscheinlich der Vorfahr der heutigen afrikanischen Menschenaffen und des Menschen.

Gesichtsvergleich mit den ersten Vormenschen

Im Jahr 1999 bargen meine Kollegen und ich in Rudabánya (Ungarn) einen für diese These sehr interessanten *Dryopithecus*-Schädel. Bei diesem Fossil sind erstmals Gesichts- und Hirnschädel noch verbunden. Dieser Affe hatte eine lange, niedrige Gehirnkapsel, eine abgeflachte Nasenpartie und ein vergrößertes Untergesicht – wie afrikanische Menschenaffen und frühe Vormenschen. Besonders aufschlussreich erscheint das Gesichtsprofil von *Dryopithecus*, das sich in einer Außenwölbung nach unten zu abneigt wie bei den afrikanischen Hominiden. Das Profil von Orang-Utans ist dagegen vertieft und weist aufwärts, ebenso das von Gibbons und von *Proconsul*. Im Grunde erinnert der Schädel von *Dryopithecus* stark an den von jungen Schimpansen. Dergleichen finden Paläontologen häufig bei Stammarten. Demnach entstanden die ausgeprägten Gesichter von Schimpansen, Gorillas und den frühen Menschenformen in Abwandlung des schlichteren Grundplans, den *Dryopithecus* aufwies und der sich auch bei jungen afrikanischen Menschenaffen andeutet.

Unbedingt erwähnt werden muss noch *Oreopithecus*. Dieser merkwürdige Menschenaffe lebte vor 7 Millionen Jahren, also im späten Miozän, im Gebiet der heutigen Toskana, das damals eine bewaldete Inselregion war. Von keinem anderen fossilen Menschenaffen Eurasiens kennen die Forscher das Skelett so genau. Erstmals beschrieb *Oreopithecus* 1872 der französische Paläontologe Paul Gevais. Diese Linie hatte sich von allen fossilen Primaten der Alten Welt, Menschen- wie Tieraffen, am stärksten auf Blattnahrung spezialisiert.

Im Aussehen fällt *Oreopithecus* mit seinem großen Körper und kleinen Gehirn völlig aus dem Rahmen. Er könnte ein urtümlicher gemeinsamer Vorfahr von Gibbons und Großen Menschenaffen gewesen sein. Vielleicht war er aber auch schon ein früher Großer Menschenaffe oder sogar ein naher Verwandter von *Dryopithecus*. Meike Köhler und Salvador Moyà Solà vom Miquel-Crusafont-Institut für Paläontologie in Barcelona behaupten, *Oreopithecus* sei aufrecht, auf zwei Beinen, auf Baumstämmen gegangen und habe menschenähnliche Hände besessen, mit denen er präzise greifen konnte. Die meisten Paläontologen glauben allerdings, dass dieses Tier vorzüglich ans Hangeln angepasst war. Wie auch immer: *Oreopithecus* ist ein sehr gutes Beispiel dafür, wie erfolgreich die eurasischen Menschenaffen waren und wie vielfältig sie sich an neue Umwelten anzupassen vermochten.

Wieso starben die meisten dieser Linien aus? Und wie konnten ein paar davon überdauern, von denen die heutigen Hominiden abstammen? Antworten hierzu ermöglicht die Paläoklimatologie. Die Großen Menschenaffen verdankten ihre Blütezeit in Eurasien während des gesamten Mittleren Miozäns einer üppigen subtropischen Waldvegetation und dem stets warmen Klima. Jederzeit fanden sie reife Früchte. Der hohe Wald bil-

dete mehrere Kronenstockwerke, die das Fortkommen im Geäst leicht machten.

Im späten Miozän jedoch erfolgte ein massiver Klimaumschwung, als sich die Alpen, der Himalaja und die Gebirge Ostafrikas weiter aufschoben, die Meeresströmungen verlagerten und die polaren Eiskappen zu bilden begannen. In Asien entstanden die noch heute vorhandenen Monsunzyklen. Ostafrika wurde nun immer trockener und Europa bekam ein gemäßigtes Klima. Offenbar hielten die eurasischen Großen Menschenaffen den Klimaumschwung nicht aus. Einzig die Linien von *Sivapithecus* und *Dryopithecus* überlebten – indem sie in Gebiete südlich des nördlichen Wendekreises auswichen. Von China zogen sie nach Südostasien, von Europa in die afrikanischen Tropen (siehe Seite 61 oben, Bild 4). Sie blieben in Umweltbedingungen ähnlich denen, an die sie sich in Eurasien angepasst hatten.

Dieses Szenario könnte Anhaltspunkte dafür liefern, wie und warum der aufrechte Gang des Menschen entstand. Paläontologen wissen immer noch nicht, aus welcher Fortbewegungsweise er hervorging. Fossilreihen, die das eindeutig zeigen, gibt es bisher nicht.

Aufrechter Gang und Anfänge der Menschenevolution

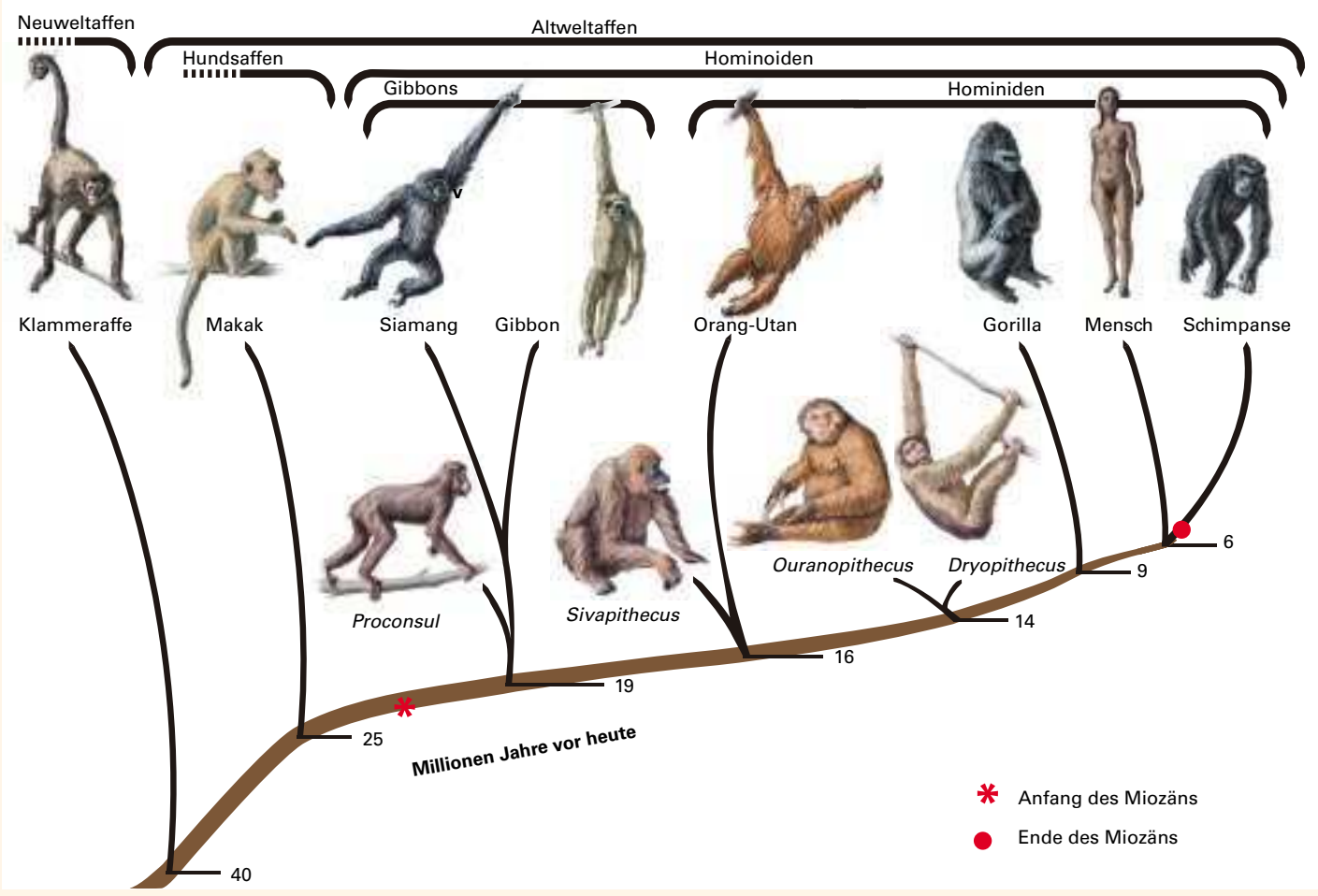
Vor allem zwei Modelle werden diskutiert. Nach dem einen hangelten und kletterten die unmittelbaren Vorfahren der ersten aufrecht gehenden Vormenschen eher in Bäumen, nach dem anderen liefen sie meistens am Boden, vielleicht in einem Knöchelgang ähnlich den Schimpansen, bei dem die Hände die Erde nicht mit der Innenfläche berührten, sondern mit der Außenseite der Fingerknöchel.

Die Vorfahren der afrikanischen Menschenaffen verließen Eurasien, als dort die dichten Wälder lichteren Baumbeständen und Graslandschaften Platz machten. Meines Erachtens überlebten sie, indem sie bestimmte Anpassungen für eine Fortbewegung am Boden erwarben. Um überhaupt schließlich bis nach Afrika zu gelangen, dürfte insbesondere der Knöchelgang unerlässlich gewesen sein. Einige Zweige dieser Primaten kehrten in Afrika wieder in dichte Wälder zurück. Andere besiedelten verschiedene mehr oder weniger locker bewaldete Landschaften. Ein Zweig drang schließlich in offenes Gelände vor und wurde zum reinen Bodenbewohner.

Die Evolution der Menschenaffen und des Menschen zeichnete sich von ▷

Evolution der Menschenaffen

Als letzter gemeinsamer Vorfahr der modernen Kleinen und Großen Menschenaffen gilt *Proconsul* aus dem frühen Miozän. Nur wenige dieser Primaten kommen als Vorfahren der Großen Menschenaffen und des Menschen in Betracht. *Sivapithecus*, ein früher Großer Menschenaffe, könnte Urahn des Orang-Utans gewesen sein. Entweder *Dryopithecus* oder *Ouranopithecus* erscheinen als mögliche Vorfahren der afrikanischen Menschenaffen und des Menschen.



▷ Anbeginn durch Flexibilität in der Anpassung aus. Dank einer Neuerung im Kauapparat konnten Menschenaffen Afrika im frühen Miozän verlassen und eine Vielzahl neuer Umwelten erschließen. In Eurasien gelang es den Großen Menschenaffen durch eine Reihe von Skelettveränderungen, sich mit ihren einzelnen Zweigen in recht unterschiedlichen Bedingungen einzurichten. Überdies halfen ihnen große Gehirne, komplexe soziale wie ökologische Situationen zu meistern.

Mit diesen Voraussetzungen überstanden einige wenige von ihnen den dramatischen Klimawandel im späten Miozän und vor etwa 9 Millionen Jahren kamen sie wieder nach Afrika. Die Linie, aus der die heutigen Menschenaffen und der Mensch hervorgingen, war gewissermaßen vorangepasst, mit drastischen Umweltveränderungen fertig zu werden. Allzu sehr überrascht es nicht, dass eine der Arten ein besonders großes Gehirn ausbildete und zum technischen Genie wurde.

Vor zwanzig Jahren begann ich als Student, mich für fossile Menschenaffen zu interessieren. Schon damals wurde mir klar, dass sich die Evolution des Menschen nur dann ergründen lässt, wenn klar ist, wann, wo, wie und woraus er entstand. Um Körperbau und Verhalten der ersten Menschen zu deuten, ziehen Wissenschaftler zum Vergleich gewöhnlich heutige Menschenaffen heran, durchaus mit großem Gewinn.

Schimpansenähnlicher Urahn

Allerdings haben sich die Menschenaffen seit ihrer Abspaltung von unserem letzten gemeinsamen Vorfahren ebenfalls weiterentwickelt. Das Studium der Arten des Miozäns bietet nicht nur eine einzigartige Sicht auf die Vorfahren der heutigen Hominiden einschließlich des Menschen. Sondern es bietet auch Einblicke in die Hintergründe der Evolution der modernen Formen.

Nachdem feststehen dürfte, dass die afrikanischen Großen Menschenaffen aus den europäischen hervorgingen, lässt sich auch der letzte gemeinsame Vorfahr von Mensch und Schimpanse skizzieren. Es müsste ein schimpansenähnlicher Waldbewohner gewesen sein, der auf dem Boden im Knöchelgang lief und sich hauptsächlich von Früchten ernährte, aber auch kleinere Tiere tötete und verzehrte. Er benutzte Werkzeuge und lebte in sehr komplexen, dynamischen Horden – wie Schimpansen und Menschen.

DAVID R. BEGUN

So könnte unser europäischer Urahn ausgesehen haben. Dieser *Dryopithecus*-Gesichtsschädel stammt aus den spanischen Vallés Penedés.

Viele Fragen sind noch offen. Von etlichen fossilen Menschenaffen existieren bisher nur Zähne und Kieferfragmente, die über ihre Statur, Hirngröße, Körperhaltung und Bewegungsweise wenig oder gar nichts aussagen. Außerdem besteht zwischen den europäischen Vorläufern der afrikanischen Großen Menschenaffen, also *Dryopithecus* und *Ouranopithecus*, und den afrikanischen Formen geographisch wie zeitlich eine beachtliche Fossillücke.

Auch bei den ersten mutmaßlichen Vormenschen ist der menschliche Stammbaum – besser Stammbusch – noch recht unklar, was die Zugehörigkeit dieser Arten betrifft. So trug der kürzlich entdeckte, 6 bis 7 Millionen Jahre alte *Sahelanthropus tchadensis* aus dem Tschad kleine Eckzähne. Vielleicht saß das Hinterhauptsloch etwas mehr unter dem Schädel, was ein Zeichen für einen aufrechten Gang wäre. Daneben wies dieser Primat manches Schimpansenmerkmal auf, unter anderem ein kleines Gehirn, ein vorspringendes Gesicht, eine flache Stirn und eine kräftige Nackenmuskulatur.

Eine Mixtur von menschen- und schimpansenähnlichen Merkmalen erscheint auch bei dem 6 Millionen Jahre alten *Orrorin tugenensis* aus Kenia. Gleiches gilt für den 5,8 Millionen Jahre alten *Ardipithecus ramidus kadabba* aus Äthiopien. Die Entdecker dieser Fossilien halten jeweils die von ihnen gefundene Art für einen Vorfahren des Menschen (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 46). An sich genügen die Daten nicht, um sagen zu können, ob es sich jeweils wirklich um einen sehr frühen Vormenschen handelte, um einen Vorfahren der modernen afrikanischen Menschenaffen oder einen Vertreter ausgestorbener Menschenaffenlinien. Meiner Meinung nach war der erste eindeutige Vormensch der 4,4 Millionen Jahre alte *Ardipithecus ramidus ramidus* aus Äthiopien.

Noch sind sich die Forscher nicht einig, ob die Vorfahren der modernen Großen Menschenaffen in Eurasien entstanden. Das liegt aber nicht an unzureichenden Hinweisen. Vielmehr begreifen einige Anthropologen Darwins eingangs erwähnte These so, dass sich die Evolution der afrikanischen Menschenaffen ausschließlich auf dem Dunklen Kontinent abgespielt haben muss.

Ein anderer Einwurf ist, dass fehlende Fossilien nicht bedeuten müssen, es habe die fraglichen Arten in der Gegend nicht gegeben. Von Afrika existieren derzeit keine fossilen Großen Menschenaffen. Das beweist keineswegs, dass sie während der fraglichen Zeit dort nicht vorkamen. Jedoch kennen Paläontologen in Afrika viele zwischen 14 und 7 Millionen Jahre alte Fossillagerstätten. In manchen davon fanden sie massenhaft Knochen von waldlebenden Tieren. An keiner tauchten bisher Überreste Großer Menschenaffen auf. Zwar könnte es sein, dass im Miozän in Afrika und Eurasien ähnliche Arten lebten – doch das ist unwahrscheinlich. ◁

David R. Begun ist an der Universität Toronto (Kanada) Professor für Anthropologie. Er war und ist an zahlreichen Ausgrabungen in Europa, Vorderasien und Afrika beteiligt.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Vom Affen zum Menschen. Teil 1: Evolution der Primaten. Von Louis de Bonis. Spektrum der Wissenschaft, Compact 1, 2001.

Rudabánya: A Late Miocene Subtropical Swamp Deposit with Evidence of the Origin of the African Apes and Humans. Von László Kordos und David R. Begun in: Evolutionary Anthropology, Bd. 11, Nr. 1, 2002, S. 45.

The Oldest Eurasien Hominoid. Von Elzmar P. J. Heizmann und David R. Begun in: Journal of Human Evolution, Bd. 41, 2001, S. 463.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

DIE PHYSIKANTEN

Wissenschaft als Kabarett

Von Tim Schröder

Hinter dem Vorhang surrt es laut, dann stakst ein Herr mit Hornbrille und Pullunder unsicher auf die Bühne – das kann nur ein Physiker sein. Er stellt einen Koffer auf einen Drehstuhl, doch schusselig, wie er ist, auf dessen Kante. Der Koffer wackelt, das Publikum erwartet, dass er fällt. Überraschung: Das Gepäckstück verharrt in einer Schieflage und plötzlich beginnt sich der Stuhl zu drehen. Die Zuschauer stoßen einander an. Fragende Blicke, Tuscheln. Ist das Zauberei?

Mitnichten. Die Show des Wissenschaftsvarietees »Physikanten & Co.« funktioniert ohne doppelten Boden. Der diplomierte Physiker Marcus Hienz hat die Truppe Ende 2000 ins Leben gerufen, um graue Theorie in buntem Gewand auf die Bühne zu bringen und allgegenwärtige Kräfte sichtbar zu machen. Physik kann faszinieren – und Laien wie Fachleute, Erwachsene wie Kinder zum Lachen bringen. Die Zuschauer dürfen raten, welches physikalische Phänomen hinter dem Trick steckt. Zwei Lösungen geben ihnen die Physikanten vor. Und oftmals geht ein Raunen durch die Menge, wenn die Mehrheit falsch getippt hat.

ALLE FOTOGRAFIEN: TIM SCHRÖDER

Ein Koffer, der auf seiner Kante steht? Die Physikanten lüften das Geheimnis ihres Tricks: Ein rotierender Kreisel stabilisiert den Koffer.

Hienz weiß: »Irgendein Experiment haben wir immer im Repertoire, auf das sogar Experten hereinfallen.« Anders als herkömmliche Zauberer lüften die Physiker anschließend das Geheimnis des Showeffekts.

Foppen, Spaßen und viel Physik

Während des Studiums hatte Hienz bereits als Jongleur und Straßenartist Geld verdient. Die Kombination mit den Naturwissenschaften ist freilich eine ungewöhnliche Verbindung. Als einer der ersten Tricks entstand das Kofferexperiment. Im Inneren des Stahlkorpus rotiert ein mehrere Kilo schwerer Kreisel, den die Physikanten hinter der Bühne per Bohrmaschine in Schwung bringen (daher das Surren). Seinen Drehimpuls behält der Kreisel auch dann bei, wenn der Koffer gekippt wird. Stellt man ihn auf einen Drehstuhl, überträgt sich die Rotation auf das Sitzmöbel.

Die Physikanten treten zu zweit auf. Der eine mimt den verstaubten Forscher, der andere den peppigen Entertainer. Die beiden foppen sich, diskutieren und spaßen miteinander. Der Kontrast zwischen dem Wissenschaftler und seinem quirligen Kompagnon macht den Reiz der Show aus. Wenn der Physiker beginnt, von der Isotropie des Raumes zu schwafeln, rollt der andere die Augen – ein flotter Spruch dazu und ein Lacher ist ihnen sicher. Ganz nebenbei schütteln die beiden wissenschaftliche Erklärungen für ihre Bühnenexperimente aus dem Ärmel, die jeder versteht. Das ist entscheidend, denn die Zuschauer sollen begreifen, was geschieht. »Ich sehe unsere Arbeit als Teil einer aktuellen Bewegung, die versucht, Wissenschaft populär zu machen«, sagt Hienz. Ganz offensichtlich geht das Konzept des Dortmunders auf. Die vergangenen drei Jahre waren gespickt mit Auftritten in Forschungsinstituten, Schulen, Industrieunternehmen oder bei Festivals.

Ebenfalls von Anfang an dabei ist das schwebende Boot. In einem Plexiglaskasten dümpelt geisterhaft ein Schiff aus hauchdünner Folie. Es schwankt, als treibe es auf Wasser. Aber da ist keine Flüssigkeit zu sehen. Während das Publikum den Fliegenden Holländer bestaunt, rufen die Physikanten selbstbewusst: »Vergessen Sie Copperfield!« Schließlich ist Physik keine Zauberei, kein inszenierter Bluff. Sie ist ganz real. »Was meinen Sie, stecken Auftrieb oder Magnetismus dahinter?« Die Erklärung folgt nach der Abstimmung: Der Kasten ist zur Hälfte mit Schwefelhexafluorid gefüllt, einem Gas, das etwa fünfmal dichter als Luft ist. Das reicht, um dem Boot Auftrieb zu geben.

Gute Show – viel Tüftelei

Stets reist ein Techniker mit, der die Show aus dem Effeff kennt und Knalleffekte richtig in Szene setzen kann. Etwa den zischenden Geysir, der auf die Minute genau mit lautem Fauchen Dampf ablässt. Das zwei Meter hohe Gerät besteht aus einem Glaskolben, auf dem ein langes Plastikrohr steckt. Beides ist mit Wasser gefüllt. Während der Show erhitzen kleine Bunsenbrenner das Wasser im Kolben. »Wie beim echten Geysir auf Island auch drückt die hohe Wassersäule auf das siedende Wasservolumen«, erklärt Hienz. Durch diesen Druck erhöht sich die Temperatur im Kolben auf rund 104 Grad Celsius. Nach und nach schiebt der entstehende Dampf das Wasser aus der Säule, bis der Druck der Wassersäule schließlich so gering ist, dass sich das heiße brodelnde Wasservolumen schlagartig in Dampf verwandeln kann. Prustend bricht der Geysir aus.

Für die Idee seiner Wissenschaftsshow hat Hienz inzwischen mehrere Existenzgründer-Preise eingeheimst. Der eine bescherte ihm einen Halbtagsjob an der Universität Dortmund. Ganz ohne Lehrverpflichtungen kann sich Hienz dort bis

»Vergessen Sie Copperfield!« Das Geisterschiff schwebt, die Ursache dafür ist unsichtbar: ein schweres Gas.

2004 seiner Show widmen. »Zum einen müssen wir Experimente finden, die auf der Bühne etwas hermachen. Zum anderen Geräte bauen, die richtig gut funktionieren, damit der Effekt tatsächlich deutlich wird.« Das sei technische Detailarbeit, die Zeit und Geld koste.

Hienz hat sein Repertoire seit dem Start vor drei Jahren deutlich erweitert. Neben der Mechanik- gibt es eine Wassershow. Während der Wissenschaftstage »Physics on Stage« im holländischen Noordwijk (siehe Kasten) nutzte Hienz Videotechniken, um Fraktale entstehen zu lassen, jene abstrakten Muster, die aus immer gleichen Gebilden zu komplexen Strukturen wachsen. Die Themen regenerative Energie und Optik liegen derzeit noch in der Schublade – der Bau der Geräte würde zu viel Zeit schlucken. Gute Show-Physik gibt es zum Glück nicht von der Stange. ◁

Tim Schröder hat Biologie und Physik studiert. Er lebt als freier Autor in Oldenburg.

»Physics on Stage«

Wer junge Menschen für die Physik begeistern will, muss diese spannend verpacken. Mehrere europäische Forschungseinrichtungen haben deshalb das Bildungsfestival »Physics on Stage« ins Leben gerufen. Eine Woche lang präsentieren Physiklehrer, -didaktiker und -dozenten aus 22 europäischen Ländern kreative Ideen, wie sich Physik packend vermitteln lässt. Im November 2000 fand »Physics on Stage« erstmals im Genfer Forschungszentrum Cern statt. Im vergangenen Jahr und in diesem November lud die Esa in ihre niederländische Zentrale in Noordwijk ein.

Das Programm teilt sich in drei Rubriken. Dazu gehört eine Ausstellung, in der Lehrer und Schüler eigene Experimente oder selbst entwickelte Geräte zeigen, so etwa den Bausatz für ein Elektronenmikroskop. Größere Schulprojekte oder Unterrichtskonzepte werden in Plenarvorträgen vorgestellt – in diesem Jahr beispielsweise »From Science to Life«, ein Projekt von vier Schulen aus Spanien, Italien und Deutschland, das den historischen Kontext von Entwicklungen aufzeigen will, die das alltägliche Leben beeinflusst haben. Zum Dritten gibt es ein Bühnenprogramm. Schülergruppen, Studenten und Lehrer zeigen dort Physik mit Aha-Effekt – etwa Karate-Physik: »Warum kann ein Körper harte Dinge zerschlagen?«

Professionelle Künstler wie die Physikanten machen nur einen kleinen Teil dieser Performances aus. Wer mit dabei sein darf, entscheiden eine internationale Jury aus Vertretern der Forschungseinrichtungen und nationale Gremien. Zur deutschen Jury gehören unter anderem Physik- und Hochschullehrer, Vertreter der Deutschen Physikalischen Gesellschaft sowie der Bildungsbehörden.

Bislang war **»Physics on Stage«** eine geschlossene Veranstaltung. In diesem Jahr öffnete das Festival seine Türen erstmals für einen Tag auch der interessierten Öffentlichkeit. Vom kommenden Jahr an sollen neben der Physik auch andere Naturwissenschaften in den Vordergrund rücken. Die Veranstaltung wird deshalb zukünftig »Science on Stage« heißen. Veranstaltungsort ist 2004 die Europäische Synchrotronquelle ESRF in Grenoble.

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK –
Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen
Technologie, Jobs,
Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

Forum MedizinTechnik
und Pharma in Bayern e. V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

Kernmechanik –
die neue Quantenphysik
von Kernspin bis Kosmologie
www.kernmechanik.de

PAN-TEXT® Übersetzungen GmbH
Kompetente Fachübersetzungen, DTP
Industrie – Technik – Medizin – Verträge etc.
www.pantext.com

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94
E-Mail: m.grigo@vhb.de

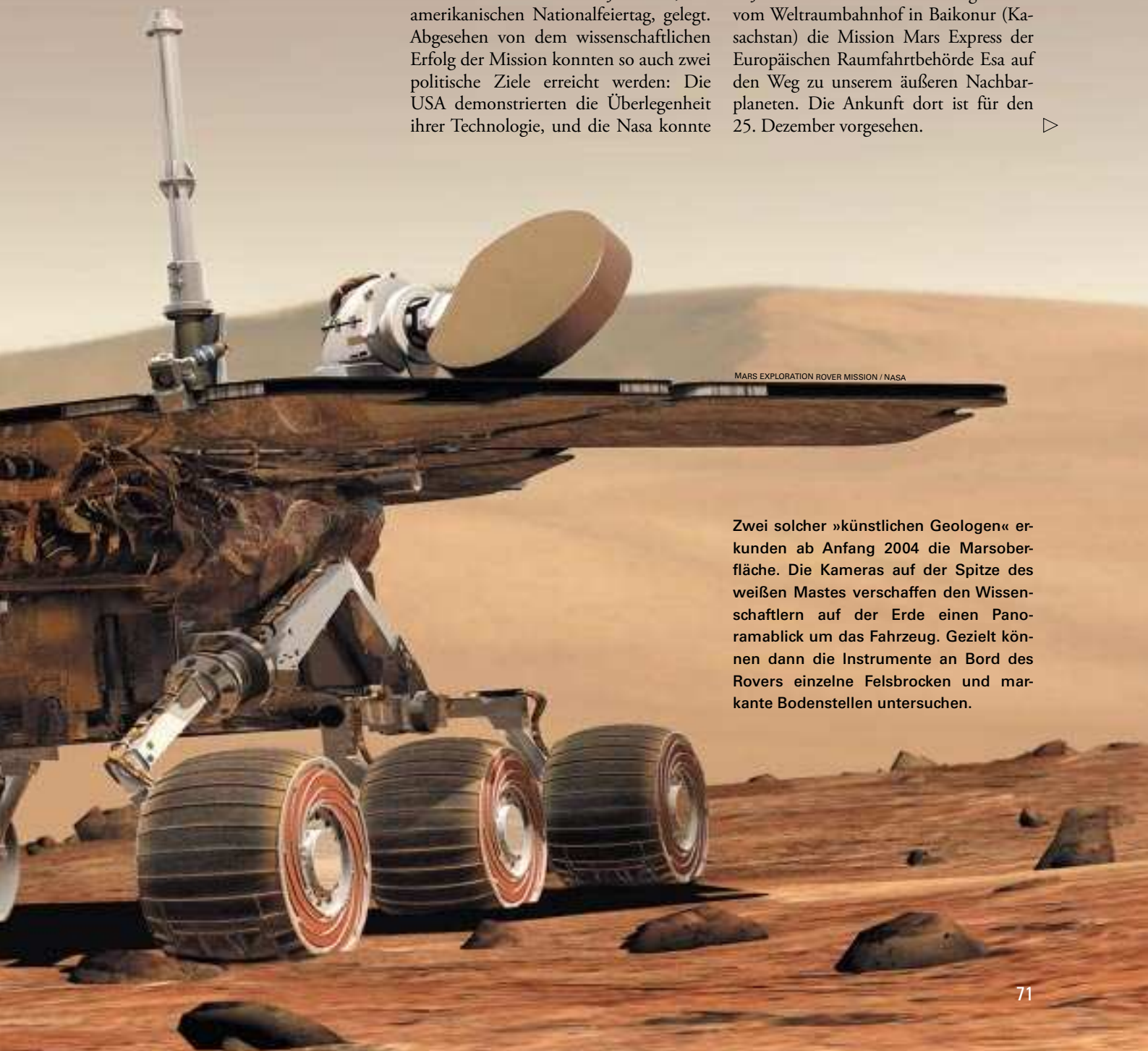
Erkundung des Roten Planeten

Die Marsforschung macht mobil: Zwei kleine Fahrzeuge und ein stationäres Labor werden in den kommenden Wochen auf unserem roten Nachbarplaneten landen und dort nach Wasser und eventuellen Resten primitiven Lebens suchen.

Von Marco Cattaneo und Uwe Reichert

Vor sechs Jahren sorgte die erfolgreiche Landung von Mars Pathfinder auf unserem roten Nachbarplaneten für Furore. Als die Sonde im Ares Vallis niederging und dann das kleine Fahrzeug Sojourner über die staubige Gerölllandschaft zuckelte, war eine zwei Jahrzehnte währende Pechsträhne in der Marsforschung zu Ende gegangen. Die US-Luft- und Raumfahrtbehörde Nasa hatte die Landung medienwirksam auf den 4. Juli 1997, den amerikanischen Nationalfeiertag, gelegt. Abgesehen von dem wissenschaftlichen Erfolg der Mission konnten so auch zwei politische Ziele erreicht werden: Die USA demonstrierten die Überlegenheit ihrer Technologie, und die Nasa konnte ihr durch Sparzwänge und Fehlschläge beschädigtes Ansehen aufpolieren.

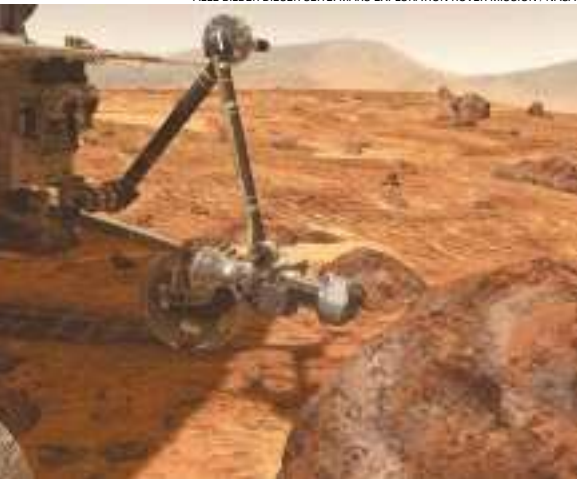
Nun wagt die Nasa einen neuen Versuch – mit zwei Sonden gleichzeitig. Am 10. Juni startete von Cape Canaveral die Mission Mars Exploration Rover A (mit Spitznamen Spirit). Vier Wochen später, am 8. Juli, folgte die Schwestersonde Mars Exploration Rover B, genannt Opportunity. Beide Sonden werden im Januar 2004 Landeroboter zur Erforschung der Marsoberfläche absetzen. Dieses Mal ist die Nasa jedoch nicht alleine: Bereits am 2. Juni brachte eine russische Trägerrakete vom Weltraumbahnhof in Baikonur (Kasachstan) die Mission Mars Express der Europäischen Raumfahrtbehörde Esa auf den Weg zu unserem äußeren Nachbarplaneten. Die Ankunft dort ist für den 25. Dezember vorgesehen. ▷



MARS EXPLORATION ROVER MISSION / NASA

Zwei solcher »künstlichen Geologen« erkunden ab Anfang 2004 die Marsoberfläche. Die Kameras auf der Spitze des weißen Mastes verschaffen den Wissenschaftlern auf der Erde einen Panoramablick um das Fahrzeug. Gezielt können dann die Instrumente an Bord des Rovers einzelne Felsbrocken und markante Bodenstellen untersuchen.

ALLE BILDER DIESER SEITE: MARS EXPLORATION ROVER MISSION / NASA



Die Landung der Nasa-Rover: Ein Fallschirm bremst die Geschwindigkeit der Sonde ab, bis dicht über dem Boden Rückstoßraketen zünden; eingehüllt von schützenden Airbags hopst die Sonde über den Marsboden, bis sie schließlich zur Ruhe kommt (Bildserie oben). Der Roboterarm der Rover trägt eine »Hand« mit mehreren Instrumenten, die Boden- und Gesteinsproben analysieren (unten).

▷ Mars Express ist die erste europäische Mission, die auf einem anderen Himmelskörper landet. Sie gilt zugleich als Prototyp für so genannte flexible Missionen der Esa im Rahmen ihres Langzeit-Wissenschaftsprogramms »Horizon 2000 plus«. Mit derartigen Unternehmungen, die kostengünstig und mit kurzer Vorbereitungszeit durchgeführt werden sollen, will die Esa auf aktuelle wissenschaftliche Fragestellungen reagieren.

Internationale Kooperation

Auch wenn die drei Raumsonden gleichsam als Wettläufer auf Mars zurasen, handelt es sich hier nicht um einen kämpferischen Wettstreit zwischen den Nationen, wie wir ihn von den Mondlandeprogrammen der USA und der damaligen UdSSR zu Zeiten des Kalten Kriegs kennen. Raumfahrtmissionen sind zwar noch immer Prestigeprojekte, doch längst keine politischen Konkurrenzveranstaltungen mehr. Die Vereinigten Staaten, die Europäische Union und auch Russland arbeiten auf vielen Gebieten der Wissenschaft und der Raumfahrt eng zusammen – nicht nur bei der Internationalen Raumstation ISS. Und die Unternehmungen der Esa brauchen sich hinsichtlich technischem Anspruch und wissenschaftlicher Ausbeute längst nicht mehr hinter denen der Nasa zu verstecken. Im Gegenteil: Dort, wo die beiden Raumfahrtbehörden gleichartige Missionen durchgeführt haben wie etwa in der Röntgen- und Gammastrahlenastronomie, haben die wissenschaftlichen Ergebnisse der Europäer diejenigen aus Übersee mitunter weit übertroffen.

Die Ziele der drei aktuellen Marsmissionen – denen in den nächsten zehn Jahren weitere folgen werden – weisen viele Gemeinsamkeiten, aber auch einige Unterschiede auf.

Die europäische Sonde Mars Express soll wichtige neue Daten zur Geologie, Mineralogie und Atmosphäre des Mars liefern sowie nach Spuren von Wasser suchen. Es gibt starke Hinweise darauf, dass der Rote Planet in seiner Frühzeit über einen großen Ozean verfügte, aber im Laufe seiner Entwicklungsgeschichte das Wasser auf noch unbekannte Weise verschwunden ist. Womöglich lassen sich unter der Marsoberfläche noch Reste davon finden – und vielleicht sogar Indizien für einst vorhandenes Leben. Umfangreiche Messungen nimmt der Orbiter von Mars Express vor, der den Planeten in einer polaren, elliptischen Umlaufbahn umrunden soll. Zusätzlich zu dieser Fernerkundung wird eine Landeeinheit namens Beagle 2 – so benannt in Anlehnung an das Expeditionsschiff Beagle, mit dem der Biologe Charles Darwin in den 1830er Jahren Hinweise für seine Evolutionstheorie zusammentrug – den Marsboden direkt untersuchen und auch in die Tiefe graben. Von den Ergebnissen erhoffen sich die Wissenschaftler Auskunft über die Entwicklungsgeschichte des Planeten. Wenn sie beispielsweise herausfinden könnten, warum das Wasser von der Marsoberfläche verschwunden ist, so könnten sie daraus schließen, ob den irdischen Ozeanen vielleicht ein ähnliches Schicksal bevorsteht.

Auch die beiden Nasa-Sonden Spirit und Opportunity setzen je eine Landeeinheit ab. Im Gegensatz zu Beagle 2, die ortsfest ist, werden die beiden Landefahrzeuge mehrere hundert Meter auf der Marsoberfläche zurücklegen können. Auch sie untersuchen die Morphologie und Zusammensetzung des Gesteins in der Hoffnung, Spuren von Wasser zu finden. Allerdings können sie nur auf der Oberfläche suchen und nicht den Untergrund anbohren. Diesem Nachteil steht jedoch die großräumige Mobilität gegenüber. Auf diese Weise ergänzen sich die Esa- und die Nasa-Missionen: Durch die unterschiedliche Herangehensweise stehen der Wissenschaftlergemeinschaft letztlich umfangreichere Informationen zur Verfügung, als wenn man gleichartige Messverfahren eingesetzt hätte.

Hopplige Landung

Für das Absetzen der Bodensonden greifen die Nasa und die Esa auf eine Technik zurück, die sich bereits bei Mars Pathfinder bewährt hat: Die Landeeinheiten werden nach dem Eindringen in die dünne Marsatmosphäre mittels Fallschirmen abgebremst. Kurz vor dem Bodenkontakt zünden Rückstoßdüsen, welche die Geschwindigkeit noch weiter reduzieren. Sodann blasen sich robuste Airbags auf, um die Wucht des Aufpralls zu dämpfen. Durch die elastischen Ballons federn die Landeeinheiten zurück und hopsen in immer kleineren Sprüngen über die Marsoberfläche, bis sie schließlich zum Stillstand gelangen. Nachdem die Schutzhüllen geöffnet wurden, können die wertvollen Instrumente mit ihren Messungen beginnen.

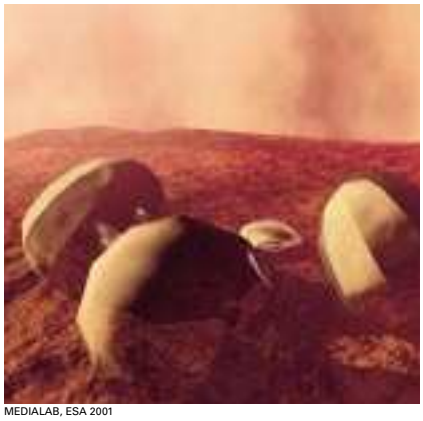
Die Nasa-Ingenieure vergleichen die einzelnen Komponenten der beiden Rover gern mit menschlichen Körperteilen. »Hals« und »Kopf«, das so genannte *Pancam Mast Assembly*, tragen eine Panoramakamera, die das Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien) konstruiert hat. Mit ihrer 360°-Rundumsicht aus einer Höhe von 1,4 Metern wird die Kamera den Wissenschaftlern auf der Erde quasi die Sichtweise eines Geologen vermitteln können, der auf der Marsoberfläche steht. Nach Auswahl der interessantesten Gesteinsbrocken in der näheren Umgebung des Fahrzeugs kann der Rover dann seine nächsten Ziele ansteuern.

Spektakuläres Minilabor

Die Panoramakamera besteht aus zwei Digitalkameras mit CCD-Sensoren *(charge coupled devices)* hoher Auflösung, die wie das Augenpaar eines Menschen Stereobilder erzeugen können. Wenngleich jede Kamera nur 270 Gramm Masse hat, liefert sie Bilder, die 4000 Pixel hoch und 24 000 Pixel breit sind. Das entspricht der dreifachen Auflösung der Sojourner-Kamera. Somit werden die Rover noch spektakulärere Aufnahmen von der Marsoberfläche liefern als jene, die uns Sojourner vor sechs Jahren gesendet hat.

Der »Hals«, der die Panoramakamera trägt, dient zugleich als Periskop für ein weiteres Fernerkundungsinstrument: Über Spiegel wird Infrarotstrahlung zu einem kleinen Spektrometer geleitet, das sich im Körper des Rovers befindet. Dieses so genannte Mini-TES *(Miniature Thermal Emission Spectrometer)* kann anhand der Wärmestrahlung der Gesteine und des Bodens Vorkommen und Häufigkeit bestimmter Minerale ermitteln. So hofft man, mit Mini-TES auch Karbonate und Lehmsorten aufzuspüren, die sich normalerweise unter der Einwirkung von Wasser bilden.

EUROPEAN SPACE AGENCY



MEDIALAB, ESA 2001

Airbags federn den Aufprall des muschelförmigen Esa-Landers Beagle 2 ab (links). Nach dem Aufklappen von Solarmodulen untersucht ein Roboterarm mit seinen Instrumenten einen Radius von achtzig Zentimetern um die Landeeinheit. Zudem kann ein spezieller Bohrer Materialproben aus 1,5 Meter Tiefe entnehmen (oben).

Zu den weiteren Gliedmaßen des Rovers gehört ein Roboterarm, der wie ein menschlicher Arm mit drei Gelenken versehen ist: Schulter, Ellbogen und Handgelenk. An der »Hand« befinden sich vier kleine Geräte. Eines ist eine Fräse, das *Rock Abrasion Tool* (RAT). Es ähnelt einer Schleifscheibe, die selbst in hartes Gestein ein Loch von fünf Millimeter Tiefe und 45 Millimeter Durchmesser fräsen kann. Sobald die Arbeit des RAT beendet ist, können die drei Messinstrumente, die sich ebenfalls an der Hand des Rovers befinden, die freigelegte Oberfläche des Gesteins untersuchen.

Ein miniaturisiertes Mößbauer-Spektrometer, gebaut von der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, kann den Gehalt eisenhaltiger Minerale im Gestein feststellen (siehe Kasten auf Seite 75). Dadurch bekommen die Wissenschaftler Hinweise auf die Rolle von Wasser während der Gesteinsentstehung, und sie können abschätzen, bis zu welcher Tiefe atmosphärische Einflüsse im Nachhinein den Marsboden verändert haben.

Mehrere Monate Messzeit

Das Alphateilchen-Röntgenspektrometer (APXS), konstruiert vom Max-Planck-Institut für Chemie, ebenfalls in Mainz, ist eine weiter entwickelte Version des Instruments, das sich an Bord von Sojourner befunden hat und als »Schnüffler« bekannt geworden ist. Der Messkopf enthält radioaktives Curium-244, das die Oberfläche des Gesteins mit Alphateilchen und Röntgenstrahlung bombardiert. Das beprobte Gestein sendet dann seinerseits Röntgenstrahlung aus, deren Spektrum von dem Gerät analysiert wird. Auf diese Weise erhalten die Wissenschaftler Auskunft über die chemische Zusammensetzung der untersuchten Gesteine. Die Mikroskopkamera schließlich, ▷

IN KÜRZE

▶ **Der Mars ist** von allen Planeten des Sonnensystems **der Erde am ähnlichsten.** Es gibt zahlreiche Indizien, dass er einst über beträchtliche Mengen an Wasser verfügte und womöglich einfache Formen von Leben beherbergte. Aber wo sind die Gewässer geblieben? Ist das Leben erloschen oder hat es sich mitsamt dem Wasser in die Tiefen des Planeten zurückgezogen?

▶ **Drei Marsmissionen** sollen diese Fragen nun beantworten helfen: **Mars Express,** ein Unternehmen der Europäischen Raumfahrtbehörde Esa, sowie die beiden Nasa-Missionen **Mars Exploration Rover A und B.**

▶ Ein stationäres Modul namens **Beagle 2** und **zwei mobile Roboter** werden auf Mars landen und Boden- und Gesteinsproben analysieren. Die Instrumente dieser drei Landeeinheiten werden durch umfangreiche Fernerkundungsexperimente an Bord des Mars Express Orbiters ergänzt.

▷ konstruiert vom Jet Propulsion Laboratory, ist ein für diese Art von Mission schon fast banales Instrument, allerdings von entscheidender Wichtigkeit für die geologische Untersuchung. Es liefert Oberflächenbilder der angeschliffenen Marsgesteine, auf denen man deren mikroskopische Struktur erkennen kann. Handelt es sich um Sedimente, lässt sich daraus wiederum erschließen, ob es einst Seen oder Wasserläufe auf der Marsoberfläche gegeben hat.

Jeder der beiden Rover soll mindestens neunzig Marstage im Einsatz sein. (Ein Marstag ist mit 24 Stunden und 37,4 Minuten etwas länger als ein Tag auf der Erde.) Doch wenn es der Zustand der Fahrzeuge und der Instrumente erlaubt, wird die Nasa die Mission bis über den April 2004 hinweg fortführen.

Das Pendant der Esa soll nach seiner Landung Ende Dezember mindestens sechs Monate lang den Marsboden analysieren. Beagle 2 wird auf der Isidis Planitia niedergehen, einer Tiefebene auf der nördlichen Hemisphäre des Mars. Anders als die beiden Nasa-Rover wird Beagle 2 am Landepunkt verbleiben. Er ist nicht mobil, und sein Aussehen gleicht einer aufgeklappten Muschel.

Beagle 2 sucht Lebensspuren

Nachdem die beiden Viking-Sonden der Nasa Mitte der 1970er Jahre erstmals – und vergeblich – direkt nach Lebensspuren auf der Marsoberfläche gesucht haben, wird Beagle 2 nun einen erneuten Versuch unternehmen. Wenn es jemals mikrobielle Lebensformen auf dem Roten Planeten gegeben hat, dann könnte ihre biologische Aktivität chemische Spuren hinterlassen haben. Hinweise darauf glaubten Wissenschaftler bereits in Meteoriten gefunden zu haben, die offenbar vom Mars stammen (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1996, S. 112 und 2/1998, S. 70). Die Instrumente von Beagle 2 werden zum einen nach Resten komplexer organischer Verbindungen suchen, die beim Zerfall biologischen Materials entstehen. Zum anderen analysieren sie das Verhältnis der Kohlenstoffisotope C-12 und C-13. Auf unserem Heimatplaneten nämlich hat die biologische Aktivität das natürliche Verhältnis dieser beiden stabilen Kohlenstoffisotope verschoben: Leben auf der Erde bevorzugt das leichtere Isotop C-12. Falls es also gelingen sollte, in Proben des Marsgesteins oder -bodenmaterials Strukturen zu finden, deren C-12-Anteil höher ist als der von Kohlenstoffverbindungen in der Umgebung, so hätte man ein bedeutendes Indiz dafür gefunden, dass der Rote Planet einst Leben beherbergt hat.

MARS EXPLORATION ROVER MISSION / NASA

Die Bremsfallschirme der beiden Rover wurden im größten Windkanal der Welt im Ames-Forschungszentrum der Nasa getestet.

Gleich nach der Landung wird Beagle 2 das umgebende Gelände mit einem Stereokamerasystem sondieren, das auf einem Gelenkarm montiert ist. Die Wissenschaftler auf der Erde können anhand dieser Aufnahmen interessante Steine und Bodenstrukturen für die nähere Untersuchung auswählen. Materialproben können sowohl von der Oberfläche als auch aus dem Untergrund entnommen werden. Felsbrocken werden zunächst mit einer Schleifscheibe bearbeitet, um grobes Material zu entfernen und das Innere freizulegen. Ein spezieller Bohrer, den das DLR-Institut für Raumsimulation in Köln gemeinsam mit russischen Kollegen unter dem Namen Pluto *(Planetary Underground Tool)* entwickelt hat, kann Proben noch aus 1,5 Meter Tiefe entnehmen. Anstatt ein Bohrgestänge dieser Länge einzusetzen, haben die Wissenschaftler ein Gewicht sparendes »Maulwurfprinzip« angewandt: Pluto besteht aus einem kompakten zylindrischen Eindringkörper mit Kegelspitze, der sich selbsttätig in den Untergrund vorarbeitet und nur per Kabel mit dem Beagle-2-Landegerät verbunden bleibt.

Im Laufe der Mission soll Pluto drei Proben aus dem Untergrund entnehmen und sie mittels des Greifarms dem *Gas Analysis Package* (GAP) im Inneren des Landegeräts zur Untersuchung vorlegen. Dieser Gasanalysator – entwickelt von der Open University in Milton Keynes (Großbritannien) unter Beteiligung des Max-Planck-Instituts für Aeronomie in Katlenburg-Lindau – erhitzt die Proben schrittweise und untersucht das bei der Verbrennung von Kohlenstoffverbindungen frei werdende Kohlendioxidgas in einem Massenspektrometer auf seinen Anteil an C-12 und C-13. Reste organischen Materials geben sich dabei zu erkennen, indem sie Kohlendioxid bei geringerer Temperatur freisetzen, als es bei anorganischem Karbonatgestein der Fall ist.

Unterstützung durch den Orbiter

Beagle 2 verfügt ferner über mehrere Messinstrumente zur chemischen und mineralogischen Untersuchung des Gesteins und Bodenmaterials: ein Röntgen-Fluoreszenz-Spektrometer, eine Mikroskopkamera und – wie die beiden Rover – ein Mößbauer-Spektrometer. Sensoren für die Bestimmung der Umweltbedingungen und der solaren UV-Strahlung komplettieren die Analysegeräte.

Während Beagle 2 und die beiden amerikanischen Landefahrzeuge die Marsoberfläche direkt untersuchen, wird der in der Umlaufbahn verbliebene Orbiter der Mars-Express-Mission mindestens ▷

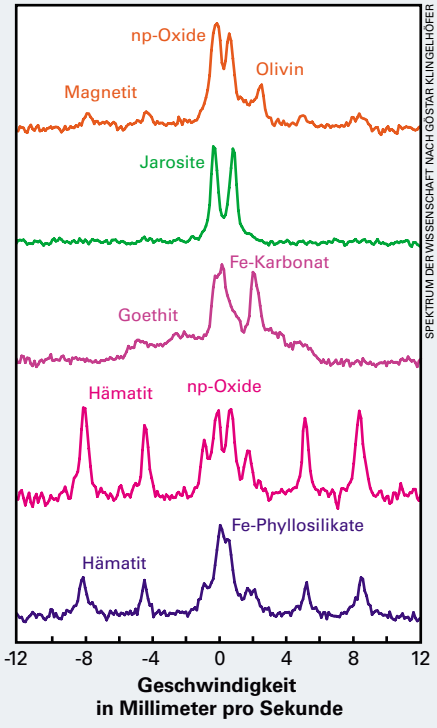
Dem Eisen auf der Spur

Ein raffiniertes Spektrometer analysiert die Zusammensetzung der Marsgesteine.

Von Göstar Klingelhöfer

Sowohl die beiden Nasa-Rover als auch die Landeeinheit Beagle 2 der Mars-Express-Mission der Esa enthalten ein so genanntes Mößbauer-Spektrometer. Kaum größer als eine Getränkedose vermag das Instrument Informationen über die Mineralogie des Marsbodens und -gesteins zu liefern.

Das Messverfahren beruht auf einem kernphysikalischen Effekt. Ein angeregtes Atom, das seine Anregungsenergie durch Aussenden eines Gammaquants abgibt, erfährt dabei einen Rückstoß – ähnlich wie ein Schütze, der ein Gewehr abfeuert. Durch den Rückstoß verschiebt sich die Energie des Gammaquants, und zwar in der Regel um mehr, als es der Energieunschärfe – die Physiker sprechen hier auch von der Linienbreite – des Gammaquants entspricht. Ist das emittierende Atom hingegen nicht frei, sondern im Kristallgitter eines Festkörpers eingebaut, nimmt der gesamte Kristall den Rückstoß auf. Die Energie des Quants bleibt dann unverändert, die Linienbreite ist also sehr schmal. In diesem Fall kann das emittierte Gammaquant von einem anderen Atom im Kristall absorbiert werden. Entdeckt hat diese rückstoßfreie Kernresonanzabsorption von Gammastrahlen 1956 der deutsche Physiker Rudolf Mößbauer (der dafür 1961 den Nobelpreis für Physik erhielt).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH GÖSTAR KLINGELHÖFER

Mit Mimos II lassen sich verschiedene Eisenverbindungen identifizieren wie zum Beispiel Hämatit, Magnetit, Karbonat und Goethit sowie Eisenoxidteilchen, die weniger als einen Nanometer groß sind (np-Oxide).

Der Mößbauer-Effekt, wie man das Phänomen auch nennt, ermöglicht extrem genaue spektroskopische Untersuchungen der Kernzustände. Wegen der äußerst geringen energetischen Breite der Emissionslinie zerstört eine geringfügige Verschiebung im Energiezustand des Atomkerns die Resonanzbedingung, sodass keine Absorption mehr stattfindet.

Derartige Energieverschiebungen und quantenmechanische Aufspaltungen werden über elektrische und magnetische Felder von der chemischen und kristallografischen Umgebung des Atomkerns verursacht; im Falle von Eisen sind sie charakteristisch für die jeweils vorliegende Eisenverbindung. Mittels Mößbauer-Spektrometrie lässt sich somit der »Fingerabdruck« jedes eisenhaltigen Minerals erkennen.

Mit Doppler zum Ziel

Um die Energieverschiebungen zu bestimmen, braucht man zunächst eine radioaktive Quelle, die Gammaquanten aussendet. Die Wechselwirkung dieser Gammaquanten mit dem Absorber, dem Probenmaterial, wird gemessen, indem man die Quelle mit definierter Geschwindigkeit bewegt. Eine Geschwindigkeit von einem Millimeter pro Sekunde verschiebt dabei die Energie der Gammastrahlen infolge des Doppler-Effekts um etwa das Zehnfache der natürlichen Linienbreite. Durch Bewegen der Quelle mit der »richtigen« Geschwindigkeit lässt sich demnach wieder eine Resonanzabsorption herstellen.

Mit dem beschriebenen Verfahren kann man also die mineralogische Zusammensetzung von eisenhaltigen Gesteinen bestimmen – was gerade bei dem Planeten Mars eine der zentralen offenen Fragen ist. Da die unterschiedlichen Eisenverbindungen nur unter charakteristischen Bedingungen entstehen, lässt sich aus ihrem Vorkommen auf die Umweltbedingungen schließen, unter denen sie sich gebildet haben. Im Zusammenhang mit der Frage nach der Existenz beziehungsweise dem Verbleib von Wasser auf dem Mars wollen die Wissenschaftler auch herausfinden, auf welche Eisenverbindungen die magnetische Komponente im rötlichen Marsstaub zurückzuführen ist.

Für den Einsatz auf den Marssonden hat meine Arbeitsgruppe am Institut für Kernphysik der TU Darmstadt beziehungsweise am Institut für Anorganische Chemie und Analytische Chemie der Universität Mainz ein miniaturisiertes Mößbauer-Spektrometer namens Mimos II entwickelt. Das Mini-Gerät hat eine Masse von etwa 500 Gramm und einen Energieverbrauch von weniger als zwei Watt. Es wird einfach auf die zu untersuchende Oberfläche aufgesetzt. So werden die drei Exemplare von Mimos II ab Januar 2004 den Oxidationszustand der Marsoberfläche sowie die Art der eisenhaltigen Mineralien in den Gesteinen und ihrer Verwitterungsprodukte ermitteln.

GÖSTAR KLINGELHÖFER

Das Spektrometer Mimos II wurde unter anderem in der Mojave-Wüste in Kalifornien getestet. Das Instrument ist hier auf einem Basaltstein in Messposition platziert.

Göstar Klingelhöfer ist promovierter Physiker und am Institut für Anorganische Chemie und Analytische Chemie der Universität Mainz tätig.

▷ zwei Jahre lang eine umfangreiche Fernerkundung durchführen. An Bord sind sieben Instrumente mit herausragenden Eigenschaften, mit denen sich die Wissenschaftler einen Durchbruch in der Marsforschung erhoffen.

Das Radar-Experiment Marsis *(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding)*, dessen vierzig Meter lange Antenne Radiowellen im Frequenzbereich von 1,3 bis 5,5 Megahertz aussendet, kann auf der Nachtseite des Planeten dessen obere Schichten bis zu einer Tiefe von 5000 Metern sondieren.

Wo ist das Wasser geblieben?

Auf der Tagseite des Mars erlaubt das Radar-Experiment die Untersuchung der Hochatmosphäre; so wird etwa die Elektronendichte in der Ionosphäre gemessen und der Einfluss des Sonnenwindes – eines stetigen Stromes geladener Teilchen, der von der Sonne ausgeht – auf die obere Marsatmosphäre bestimmt. Marsis wurde unter der Leitung der Universität La Sapienza in Rom entwickelt. Mit diesem Experiment möchten die Wissenschaftler vor allem prüfen, ob ein Teil des einst auf der Marsoberfläche reichlich vorhandenen Wassers in das Planeteninnere gesickert ist. Die Radarwellen durchdringen die Oberfläche und werden von etwaigen Hindernissen reflektiert. Durch gleichzeitiges Aussenden zweier unterschiedlicher Frequenzen und Analyse der jeweiligen Echos lassen sich die elektrischen Eigenschaften der reflektierenden Oberfläche bestimmen, aus denen man dann den Übergang von Gestein zu Wasser erkennen kann.

Die Instrumentengruppe Aspera *(Analyzer for Space Plasmas and Energetic Atoms)* registriert die Dichte von Ionen, Elektronen und energiereichen neutralen Teilchen in der oberen Atmosphäre des Mars. Sie soll ebenfalls den Einfluss des Sonnenwindes untersuchen und dabei die Frage klären helfen, wie genau dem Planeten seine einstmals dichtere und feuchtere Atmosphäre abhanden gekommen ist. Bisher weiß man nur, dass offenbar das fehlende Magnetfeld ursächlich war. Unsere Erde zum Beispiel wird durch ihr Magnetfeld geschützt, das den Strom geladener Partikel von der Atmosphäre fernhält. Der Mars indes ist diesem Teilchenbombardement schutzlos ausgeliefert: Die geladenen Partikel prallen ungehindert auf die Atmosphäre und reißen die Atome mit sich weg ins Weltall.

ESA

Der Orbiter von Mars Express wird in eine Umlaufbahn um den Roten Planeten einschwenken.

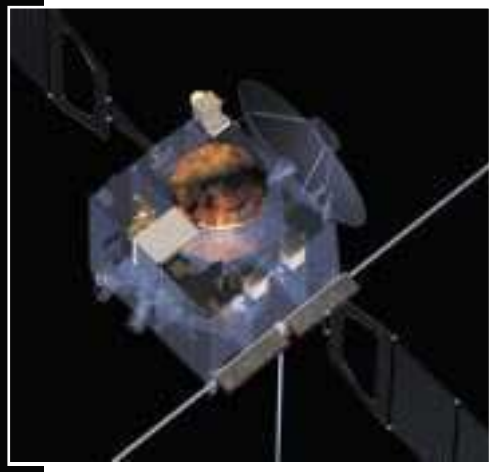
Wenngleich dieser Prozess grundsätzlich verstanden ist, so ist doch unklar, ob er alleine ausgereicht hat, die Dichte der Marsatmosphäre auf den heutigen Wert zu verringern und das Wasser von der Oberfläche des Planeten verschwinden zu lassen.

Um die Informationen über die Marsatmosphäre zu vervollständigen, untersucht das in Frankreich gebaute UV- und Infrarot-Spektrometer Spicam *(Spectroscopic Investigation of the Atmosphere of Mars)* deren Wasserdampfgehalt und Oxidationsfähigkeit. In der Tat ist die Marsatmosphäre sehr aggressiv. So werden Atome an Oberflächen leicht ionisiert. Dieses Phänomen verleiht dem Mars seine rote Farbe, da es das gesamte im Boden enthaltene Eisen rosten lässt. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich bei dem Oxidationsstoff um das Radikal OH, das bei der Spaltung von Wasserdampfmolekülen durch die ultraviolette Strahlung entsteht.

Unter italienischer Leitung steht das Planeten-Fourier-Spektrometer (PFS). Dieses Instrument soll untersuchen, wie Temperatur und Druck der Marsatmosphäre mit der Höhe variieren, wie viel Staub sie enthält und wie sich ihre chemische Zusammensetzung ändert. Das PFS analysiert dazu die Marsatmosphäre im Spektralbereich von 1,2 bis 45 Millimeter Wellenlänge und ermittelt so die Anteile von Wasserdampf, Kohlenmonoxid, Methan und Formaldehyd.

Erste 3-D-Farbkarte des Mars

Das Infrarotspektrometer Omega *(Observatoire pour la minéralogie, l'eau, les glaces et l'activité)*, das unter französischer Leitung für die missglückte Mars-96-Mission entwickelt worden war und nun erneut zum Einsatz kommt, wird vom Orbiter aus die Zusammensetzung der Marsoberfläche untersuchen. Die bisher gesammelten Daten über Silikate, Basalte und Eisenoxide, den Hauptbestandteilen der



BEIDE FOTOS: MEDIALAB, ESA 2001

Diese Grafik zeigt Beagle 2 auf dem Mars-Express-Orbiter.

Das Radar-Experiment Marsis an Bord des Mars-Express-Orbiters wird die oberen Schichten des Planeten bis in eine Tiefe von 5000 Metern durchleuchten und nach verborgenen Wasseransammlungen suchen.

Marsoberfläche, sind eher vage. Omega wird nun erstmals genauere Erkenntnisse erlangen. Insbesondere hoffen die Wissenschaftler darauf, mit diesem Instrument Karbonate nachweisen zu können, die ein starkes Indiz für das Vorkommen von Oberflächenwasser wären. Zudem können die von Omega aufgezeichneten Spektren die PFS-Daten ergänzen: Ein Teil der von der Marsoberfläche emittierten Wärmestrahlung wird nämlich in der Atmosphäre absorbiert, sodass das registrierte Spektrum auch Informationen über die Gashülle des Planeten enthält.

Eine hochauflösende Stereokamera *(High Resolution Stereo Camera, HRSC)* hat das DLR-Institut für Planetenforschung in Berlin für den Mars-Express-Orbiter beigesteuert. Mit ihr kann erstmals systematisch eine 3-D-Farbkarte einer Planetenoberfläche erstellt werden. Höhenstrukturen lassen sich mit diesem Instrument mit einer Genauigkeit von zehn bis vierzig Metern erfassen. Ein zusätzliches Teleobjektiv kann noch zwei bis drei Meter große Gegenstände auf der Marsoberfläche erkennen. Bettet man diese ultrahochaufgelösten Bilder in die farbigen Stereodaten ein, lassen sich Oberflächenstrukturen von der Größe einer Garage identifizieren. Damit können die Wissenschaftler die Geomorphologie des Planeten in bisher nicht erreichter Genauigkeit analysieren. Insbesondere erhoffen sie sich dadurch weitere Erkenntnisse über die Klimageschichte des Planeten, die sich am heutigen Oberflächenrelief ablesen lässt.

Das Experiment MaRS *(Mars Radio Science)* schließlich nutzt die Datenübertragung des Orbiters zur Erde, um die Funkwellen auf feinste Veränderungen zu untersuchen, die beim Passieren der Signale durch die Atmosphäre und das Schwerefeld des Mars entstehen. Entwickelt hat das Experiment das Institut für Geophysik in Köln in Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr in München.

Modelllabor für die Wissenschaft

All diese Experimente starten gewissermaßen einen Großangriff auf die Geheimnisse, die der Mars noch birgt. Vorausgesetzt, alles verläuft nach Plan, dann werden die Messdaten, die uns in den nächsten Monaten von unserem Nachbarplaneten erreichen, unser Wissen über diesen erdähnlichsten aller Himmelskörper im Sonnensystem beträchtlich erweitern. Zugleich wird damit der Boden bereitet für die nachfolgenden Marsmissionen, die in den nächsten Jahren starten sollen. Der Mars wird sich dadurch in ein einzigartiges Modelllabor für die Wissenschaft verwandeln, in dem sich umfassende neue Erkenntnisse über planetarische Geologie und möglicherweise auch Exobiologie gewinnen lassen. Dies wiederum wird zu einem besseren Verständnis der geologischen und klimatischen Vorgänge auf der Erde führen. Denn um unseren Heimatplaneten, seine Vergangenheit und seine Zukunft besser verstehen zu können, bedarf es einer Sicht, die wir nur erlangen können, wenn wir uns von ihm lösen und ihn im Kontext aller Planeten in unserem Sonnensystem betrachten. ◁

Dem internationalen Charakter der Marsmissionen gemäß haben zwei europäische Ausgaben des Scientific American für diesen Artikel kooperiert: **Marco Cattaneo** (links) ist Chefredakteur von Le Scienze, **Uwe Reichert** Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Die unirdischen Landschaften des Mars. Von Arden L. Albee in: Spektrum der Wissenschaft 7/2003, S. 42.

Express zum Mars. Von Lutz Richter in: Astronomie Heute, März/April 2003, S. 24.

Die Pathfinder-Mission zum Mars. Von Matthew P. Golombek in: Spektrum der Wissenschaft 9/1998, S. 62.

Die Klimageschichte des Mars. Von Jeffrey S. Kargel und Robert G. Strom in: Spektrum der Wissenschaft 1/1997, S. 50.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Bedrohte Seepferdchen

Von diesen exotischen Fischen werden jährlich 25 Millionen gefangen – als vermeintliches Heilmittel, für Aquarien oder als Souvenir. Jetzt wehren sich Naturschutz-Initiativen gegen die weltweite Ausbeutung der Bestände.

Von Monika Rößiger

Man muss schon sehr genau hinsehen, um ein Seepferdchen in seinem natürlichen Lebensraum zu entdecken. Als ich mit dem philippinischen Seepferdchen-Fischer Cesar Socias nachts im Meer tauche, um ihm bei der Arbeit zuzusehen, zeigt er in etwa drei Meter Tiefe eifrig auf eine Koralle. Erst auf den zweiten Blick erkenne ich, dass ein vermeintlicher Korallenast in Wirklichkeit ein perfekt getarntes Seepferdchen ist. Das etwa zehn Zentimeter große Tier der Art *Hippocampus kuda* ankert mit seinem Greifschwanz im Riffbewuchs. Der anmutig gebogene Hals, der schmale Kopf und die gespreizte Rückenflosse lassen es wie ein edles Ross mit flatternder Mähne aussehen. Doch die panzerartige Haut erinnert eher an einen Drachen, der Farbwechsel und die unabhängig voneinander beweglichen Augen an ein Chamäleon.

In der Antike hielten die Fischer die seltsamen Meeresbewohner für die Fohlen von Poseidons Kutschpferden, und neuzeitliche Wissenschaftler verewigten das pferdeartige Aussehen im Gattungsnamen »Hippocampus«, der alle bislang bekannten Arten von Seepferdchen umfasst. Dass sie Fische sind, sieht man ihnen wirklich nicht an. Schon im Altertum galten die bizarren Wesen als heilungs- und potenzfördernd, und dass dies bis heute in China geglaubt wird, hat inzwischen lokal zu drastischen Bestandsrückgängen geführt. Auf der zentralphilippinischen Insel Bohol, die als Seepferdchen-Lieferant eine wichtige Rolle spielt, berichten Fischer, dass ihre Fänge zwischen 1985 und 1995 um bis zu siebzig Prozent zurückgegangen sind.

RUDIE H. KUITER

Ein »gebärendes« Männchen von *Hippocampus breviceps*. Das Schlüpfen der fünfzig bis hundert Jungen kann mehrere Stunden dauern.

An die 25 Millionen Seepferdchen werden jedes Jahr rund um den Globus gehandelt – für traditionelle Medizin, Souvenirs und Aquarien. 77 Länder, darunter auch Deutschland, beteiligen sich am Handel; Hauptexporteure sind Indien, die Philippinen, Thailand und Vietnam, Hauptimporteure China, Hongkong, Taiwan und die USA.

Auf der Internationalen Artenschutz-Konferenz in Chile im November 2002 wurden alle 32 bis dahin bekannten Seepferdchen-Arten auf Antrag der USA in das Washingtoner Artenschutzabkommen aufgenommen. Es verpflichtet alle Unterzeichnerstaaten, den Handel ab 2004 zu kontrollieren, Exportgenehmigungen auszustellen und nachzuweisen, dass der Fang die Populationen nicht gefährdet.

Außerdem sollen Fangquoten festgelegt werden – doch dazu müssen die Behörden eines Landes erst einmal die Bestände zählen und vermessen lassen. »Wir wissen nicht annähernd, wie viele Seepferdchen in freier Wildbahn leben«, sagt Amanda Vincent, Assistenzprofessorin für Artenschutz-Biologie an der McGill University in Montreal (Kanada). »Bislang hat es nur wenige Studien an natürlichen Populationen gegeben. Die wichtigsten Parameter wie Wachstumsraten, Lebenserwartung und die Verteilung der Jungtiere sind bei den meisten Arten unbekannt.« Nicht einmal die Zahl der Arten ist eindeutig geklärt. Noch im Mai 2003 publizierten die Meeresbiologen Sara Lourie und John E. Randall die Entdeckung einer neuen Art in indonesischen Gewässern. *Hippocampus denise* tauften sie die nur 16 Millimeter kurzen Winzlinge, deren seltsam rotgenoppter Körper perfekt an Weichkorallen angepasst ist. *H. denise* ist die kleinste der bislang bekannten Seepferdchen-Arten.

Sara Lourie, die an der McGill University ihre Doktorarbeit über die Genetik und Biogeografie von Seepferdchen schreibt, traf beim Tauchen vor der Insel Flores auf eines dieser Zwerg-Seepferdchen und nahm es genauer unter die Lupe. Bislang galten sie als Jugendliche von *H. bargibanti*. Den ersten Hinweis, dass es sich auf Grund der Anatomie, beispielsweise der geringeren Zahl der Schwanzringe, um Erwachsene einer eigenen Spezies handeln könnte, erhielt Lourie durch Aufnahmen der Fotografin Denise Tackett. Ihr zu Ehren nannte Lourie die Art schließlich *denise*.

Vor allem das Paarungsverhalten von *Hippocampus* verblüfft und begeistert Forscher immer wieder. Die meisten Seepferdchen leben in festen Partnerschaften, die sie durch einen täglichen Begrüßungstanz pflegen. Jeden Morgen kurz nach Sonnenaufgang wartet das Männchen an einer Koralle oder im Seegras auf das Weibchen. Sobald es zu ihm hinschwimmt, ringeln die beiden ihre Schwänze umeinander und promenieren gemeinsam durchs Riff oder Seegras.

Dabei bewegen sie sich hüpfend auf und ab und wechseln ihre Farben von gelb nach grün, rot, blau oder violett. Sie drehen Pirouetten in einem Reigen, der bis zu zehn Minuten dauert. Den Rest des Tages verbringen sie dann getrennt, aber in treuer Verbundenheit. »Die Partner ignorieren alle anderen Artgenossen«, sagt Amanda Vincent. Selbst wenn ein Partner weggefangen wird oder stirbt, dauert es lange, bis der andere sich erneut bindet.

Trächtige Männchen

Als Vincent 1986 an der Universität von Cambridge mit ihrer Doktorarbeit über die Fortpflanzung von Seepferdchen begann, waren die Tiere in freier Wildbahn noch von keinem Biologen beobachtet worden. »Während die beiden durchs Wasser tänzeln«, berichtet sie, »überträgt das Weibchen die Eier mit Hilfe einer Legeröhre in die Bruttasche des Männchens.« Die morgendliche Begrüßungszeremonie findet auch während der Trächtigkeit des Männchens statt, bis zum Tag der Niederkunft. Schon am Morgen danach wird die Begrüßung zum Balztanz, der bis zu neun Stunden dauert. »Ein wunderschönes Ballett«, schwärmt die kanadische Biologin.

Nach dem Akt verschließt sich die Bruttasche des Männchens. Es besamt die Eier, sie nisten sich in der Taschenwand ein und werden von Gewebe umwachsen. Die darin enthaltenen Blutgefäße versorgen die sich entwickelnden Embryonen mit Sauerstoff. Hormone steuern den Aufbau einer plazentaähnlichen Flüssigkeit. Während der Tragezeit, die je nach Art und Wassertemperatur zwischen zehn Tagen und sechs Wochen dauert, verändert sich das Milieu in der Bruttasche. Ähnelt es anfangs noch der Körperflüssigkeit, gleicht es sich immer mehr dem umgebenden Meerwasser an – »vermutlich«, so Vincent, »um den Stress für die Jungen bei der Geburt zu reduzieren.«

Ist die Zeit reif – meist in der Nacht –, krümmt sich das Männchen stundenlang, um den Nachwuchs zu gebären. Die sieben bis elf Millimeter kleinen Neugeborenen sehen wie Miniaturausgaben ihrer Eltern aus und sind vom ersten Moment an selbstständig. Es gibt keinerlei Jungenfürsorge. Bei den Arten, die bislang in freier Wildbahn erforscht wurden, wird das Männchen schon bald nach der Geburt wieder trächtig, nicht selten am nächsten Tag.

Die Zahl der Jungen schwankt je nach Art und Alter des Vaters. »Bis zu 450 haben wir schon beim Kuda-Seepferdchen *(Hippocampus kuda)* gezählt«, berichtet Karl-Heinz Tschiesche vom Deutschen Meeresmuseum Stralsund. Der Leiter des Aquariums weiß auch, dass Seepferdchen ebenso wenig stumm sind wie andere Fische. Sie geben Laute ▷

M. NORMAN

Das prächtige, bis zu 18 Zentimeter große Queensland-Pferdchen ist äußerlich den Schwämmen angepasst, die in zwanzig bis vierzig Meter Tiefe auf Riffen vor der australischen Küste leben.

STECKBRIEF

- **Wissenschaftlicher Name:** *Hippocampus*
- **Arten:** zurzeit 33, die Systematik befindet sich aber in Revision
- **Familie:** Sygnathidae (Seenadeln)
- **Ordnung:** Sygnathiformes
- **Größe:** 1,6 bis über 30 Zentimeter
- **Farbe:** rot, braun, schwarz, gelb, grün, blau …
- **Lebensraum:** gemäßigte und tropische Meere, im flachen Wasser zwischen Seegräsern, Mangroven oder in Korallenriffen; oft in einer Tiefe von einem Meter bis 15 Metern.
- **Verbreitung:** rund um den Globus, zwischen dem 50. nördlichen und dem 50. südlichen Breitengrad. Trotz ihrer großen geografischen Verbreitung konzentrieren sich die meisten Arten auf den West-Atlantik oder die Indo-Pazifik-Region. In Europa leben zwei Arten, das braune oder rote Langschnauzige Seepferdchen *(Hippocampus ramulosus)* und das schwarze Kurzschnauzige Seepferdchen *(Hippocampus hippocampus)*. Beide werden bis zu 15 Zentimeter lang und besiedeln den gesamten Mittelmeerraum sowie die europäische Atlantikküste bis in die südliche Nordsee. Vor Großbritannien und den Niederlanden ist zumindest das Langschnauzige Seepferdchen häufig.

▷ von sich, besonders bei der Balz. Das konnte Tschiesche selbst zwar noch nicht experimentell bestätigen, »weil die Tiere so scheu sind und einen großen Bogen um das Unterwassermikrofon machen«. Als der Meeresbiologe aber einen »kleinen Kunstgriff« anwandte und die Tiere kurz am Schwanz festhielt, riefen sie »bababa-baah, bababa-baah, bababa-baah«. Diese Laute können Besucher des Stralsunder Aquariums zusammen mit anderen Fischstimmen vom Band hören.

Den spektakulären Tausch der Geschlechtsrollen bei Seepferdchen – und ihren Verwandten, den Seenadeln – analysierte ein internationales Forscherteam um Anthony B. Wilson von der Universität Konstanz und berichtete darüber im Sommer 2003 in der Fachzeitschrift »Evolution«. Wegen des außergewöhnlichen Aufwands, den die Männchen bei der Brutpflege betreiben, eignen sie sich hervorragend, um Modelle zur sexuellen Selektion zu überprüfen. In der modernen Evolutionsbiologie gilt die unterschiedliche Investition der Geschlechter in die Nachkommenschaft als treibende Kraft der sexuellen Selektion. Bei den meisten Wirbeltieren steuern die Männchen zum Nachwuchs nur das Spermium bei, während die Weibchen viel Zeit und Energie in die Aufzucht der Jungen investieren. Das führt in der Regel dazu, dass die Männchen mit ihresgleichen um Partnerinnen beziehungsweise Fortpflanzungschancen konkurrieren, während die Weibchen sich wählerisch verhalten. Wie schon Darwin erkannte, führt diese »Damenwahl« dazu, dass die Männchen zur Paarungszeit erbittert gegeneinander kämpfen oder sich besonders auffällige Signale – wie Federn, Farben oder Gesänge – zulegen, um die Weibchen für sich zu gewinnen.

Das Konzept des Elterninvestments dient üblicherweise dazu, die Geschlechtsrollen und die Intensität des Paarungswettbewerbs vorherzusagen. Auf Seepferdchen angewandt wäre bei derart hohem Aufwand der Männchen eigentlich zu erwarten, dass sich die Verhaltensweisen der Geschlechter umkehren und die Weibchen um die Männchen konkurrieren. Das tun sie aber nicht – und auch die Männchen konkurrieren nicht um die Weibchen.

Rollentausch und Partnertreue

Noch erstaunlicher ist, dass Wilsons Gruppe bei einigen Arten von Seenadeln tatsächlich so etwas wie einen Rollentausch feststellte, obgleich dort der väterliche Aufwand geringer ist als bei Seepferdchen. Seenadel-Männchen haben keine verschließbare Bruttasche, sondern zeigen – je nach Art – mehr oder weniger simple Formen des Eierausbrütens. Die schlichteste besteht nur aus einem bestimmten Platz am Bauch, an den das Weibchen seine Eier anheftet; sogar die aufwendigste Variante begnügt sich mit zwei Bauchfalten, die nach der Eiablage zusammenwachsen und den Embryonen Schutz gewähren. Dennoch entdeckten die Forscher bei einigen Seenadel-Arten – anders als bei Seepferdchen – die Umkehrung des Rollenmodells: Die Weibchen sind auffällig gefärbt und gestreift und konkurrieren um die Männchen. Dauerhafte Paarbindung gibt es nicht.

RUDIE H. KUITER

Zwei balzende Zwerg-Seepferdchen *(H. bargibanti)* vor Korallen sind nur an den schwarzen Augenpunkten zu erahnen (links außen); rechts ein Einzeltier an einer Koralle. Diese Art wird nur zwei Zentimeter lang. Auch das südaustralische Kurzkopf-Seepferdchen *(H. breviceps)* tarnt sich vorzüglich (unten).

RUDIE H. KUITER

RUDIE H. KUITER

Ein weibliches Kurzkopf-Seepferdchen *(H. breviceps)* nähert sich (von links) einem Männchen und überträgt seine Eier in dessen offene Bruttasche.

Darum beschreiben Wilson und seine Kollegen die Seepferdchen als eine »bemerkenswerte Ausnahme«: Obwohl sie die höchstentwickelten Bruttaschen haben und den größten väterlichen Aufwand treiben, gibt es bei ihnen keinen Rollentausch. Koautor Axel Meyer, Evolutionsbiologe an der Universität Konstanz, folgert daraus: »Die Beziehung zwischen Elternaufwand und Rollenverhalten ist komplizierter als nach der Hypothese vorhergesagt.« Auffällig findet er, dass der Rollentausch bei Seenadeln mit einer Neigung zur Polygamie einhergeht (die Weibchen paaren sich mit mehreren Männchen), während die meisten Seepferdchen-Arten strikt monogam leben. Diese echte Partnertreue macht Seepferdchen zu einer Rarität im Tierreich. Bei vielen Spezies, die ursprünglich als monogam galten, enthüllte die moderne Genetik, dass die Partner trotzdem fremdgehen. Bei Seepferdchen hingegen »ist die Monogamie gut dokumentiert«, sagt Wilson, »sowohl sozial als auch genetisch«.

Offenbar kann der Rollentausch beim Seepferdchen sogar die Aufspaltung einer Population in zwei separate Arten fördern. Im Mai 2003 beschrieb das Forscherteam um Adam Jones vom Georgia Institute of Technology in Atlanta »eine bislang unbeachtete Konsequenz der männlichen Trächtigkeit für die Evolution«. Mit seinen Kollegen hatte er verschiedene Populationen vor der australischen Küste untersucht.

Anhand von genetischen Daten fanden die Biologen heraus, dass die bis zu zwanzig Zentimeter langen Westaustralischen Seepferdchen *(H. subelongatus)* sich stets mit Partnern ähnlicher Körpergröße fortpflanzen. Auf diese Weise optimieren beide Geschlechter ihren Bruterfolg, so die Hypothese. Würde das Weibchen einen kleineren Partner wählen, könnte es nicht all seine reifen Eier in der Bruttasche unterbringen, was reine Verschwendung wäre. Bei einem größeren Männchen wäre die Paarkonstellation andererseits für das Männchen ungünstig, weil der Platz in seiner Bruttasche nicht optimal genutzt würde. Wenn sich also ständig Große mit Großen und Kleine mit Kleinen paaren, führt das langfristig zur Aufspaltung in zwei Arten, so die Hypothese.

»Project Seahorse«

Um die Erforschung der Seepferdchen im Freiland mit ihrem nachhaltigen Schutz zu verbinden, hat Amanda Vincent gemeinsam mit ihrer Kollegin Heather Hall von der Zoological Society of London 1996 das »Project Seahorse« gegründet – eine internationale Initiative aus rund vierzig Biologen und Sozialarbeitern, die in Kanada, Australien, den USA, Großbritannien, Portugal, Hongkong, Vietnam und den Philippinen aktiv ist. Die ungewöhnliche Biologie der Seepferdchen und ihr bezauberndes Aussehen sind den Tieren zum Verhängnis geworden. Schon antike Autoren priesen ihre vermeintliche Heilkraft gegen Harnverhaltung, Glatze oder Tollwut. In der Chinesischen Medizin und anderen asiatischen Kulturen werden Seepferdchen seit Jahrhunderten genutzt.

»Immer mehr Länder handeln mit immer mehr Seepferdchen«, warnt Amanda Vincent. Während 1995 etwa 32 Länder Seepferdchen und Seenadeln vertrieben, waren es im Jahr 2001 schon 75 Länder, mit einer starken Zunahme in Afrika und Lateinamerika. Im Jahr 2000 wurde der asiatische Handel mit getrockneten Seepferdchen auf mehr als siebzig Tonnen geschätzt. »Das wären mindestens 24,5 Millionen Seepferdchen allein für Asien«, erklärt Vincent. »Hinzu kommen die anderen Regionen und der jeweilige Konsum im Inland.« Diese Zahlen stehen für einen gewaltigen Raubbau. Sind die Bestände lokal erschöpft, treibt es die Fischer so lange zu neuen Jagdgründen, wie es für Seepferdchen eine Nachfrage gibt.

Hauptgrund für den exzessiven Bedarf ist die traditionelle Chinesische Medizin, die sich seit dem wirtschaftlichen Aufschwung in den asiatischen Ländern mehr und mehr Menschen leisten können. Hunderttausende Tiere werden außerdem für Aquarien, als Modeschmuck ▷

▷ und Andenken gehandelt. In der Chinesischen Medizin, die ihre Anhänger auch in Taiwan, Singapur und in den chinesischen Gemeinden weltweit findet, helfen Seepferdchen angeblich gegen ein breites Spektrum von Gesundheitsproblemen: Asthma, Impotenz oder Unfruchtbarkeit, Lethargie und Erschöpfung, Halsschmerzen, Hautkrankheiten und Geburtskomplikationen. Üblicherweise wird das Pulver getrockneter Seepferdchen verschrieben, das in warmem Wasser oder Alkohol aufgelöst dreimal täglich getrunken oder direkt auf Wunden aufgetragen werden soll. Mittlerweile geht ein beträchtlicher Teil der Seepferdchen in die industrielle Produktion von Pillen oder Kapseln, die unter anderem in den USA und Kanada verkauft werden.

Die Folgen des weltweiten Handels mit Seepferdchen sind besonders Besorgnis erregend, wenn man die zunehmende Verschmutzung und Zerstörung ihrer Lebensräume bedenkt. Die Seegraswiesen, Mangroven und Korallenriffe der flachen Küstengewässer zählen zu den meistbedrohten marinen Habitaten überhaupt. Durch Entwaldung in den Tropen und die damit einhergehende Erosion wird immer mehr Sediment ins Meer getragen. Das belastet Seegraswiesen oder Korallenriffe, und nicht selten sterben diese empfindlichen Lebensräume ab. Zusätzlich schwemmen die Flüsse ungeklärte Abwässer, Dünge- und Pestizidrückstände aus der Landwirtschaft ein. Korallenriffe leiden obendrein unter Dynamit- und Cyanid-Fischerei sowie unter steigenden Meerestemperaturen. Das alles bedroht die gesamte Lebensgemeinschaft des jeweiligen Ökosystems – und insbesondere die Seepferdchen.

TOMAS BERTELSEN / THE ROLEX AWARDS FOR ENTERPRISE

Ein Tauchfischer hält zwei Seepferdchen in die Kamera. In den Philippinen werden die Tiere bei Nacht mit bloßen Händen gefangen. Cesar Socias (unten) hält ein Exemplar unter die Lampe seines Fischerboots. Er unterstützt ein Projekt zum Seepferdchen-Artenschutz.

Übernutzte Seepferdchen-Bestände können sich nur langsam regenerieren. Ihre Fortpflanzungsrate ist verglichen mit anderen Knochenfischen gering. Die meisten Seepferdchen bringen pro Wurf 100 bis 200 Junge zur Welt, bei kleineren Arten wie zum Beispiel *Hippocampus zosterae* sind es aber nur fünf. Den Rekord hält ein *H.-reidi*-Männchen, das auf ein Mal 1572 Junge gebar. Bei *H. whitei* beobachtete Vincent vor Sydney (Australien) sieben Trächtigkeiten pro Jahr, die jeweils drei Wochen dauerten und einem Paar insgesamt tausend Nachkommen bescherten. Unklar ist, wie viele von ihnen überleben. Das gilt zwar auch für die Brut anderer Fische – aber ein Kabeljau-Weibchen vermag mit einem Mal rund 200 000 Eier abzulaichen.

Trauer um den verlorenen Partner

Auch die Partner- und Ortstreue der Seepferdchen erweist sich bei der Bestandserholung als Hemmschuh. »Wenn einer der Partner weggefangen wird, stoppt der andere für einige Zeit seine Reproduktion«, sagt Vincent. »Falls er sich schließlich doch wieder verpaart, kann die Nachkommenzahl des neuen Paares geringer ausfallen.« Das monogame Verhalten erleichtert Fischern obendrein ihr Handwerk. Sobald sie eins der Tiere gefunden haben, fällt ihnen mit einiger Wahrscheinlichkeit auch bald der Partner in die Hände.

Doch selbst wenn der Hinterbliebene entkommt, fällt es ihm nicht leicht, einen neuen Gefährten zu finden. Seepferdchen leben in geringen Dichten; im Seegras vor Sydney fand Vincent nur ein *Hippocampus whitei* pro sechs Quadratmeter, und das scheint typisch für viele Arten zu sein. Gelegentlich finden Fischer zwar auch 10 bis 15 Tiere pro

Quadratmeter, zum Beispiel im Seegras vor Indien. Doch das Tigerschwanz-Pferdchen *H. comes* wurde in philippinischen Gewässern in einer Dichte von nur einem Tier pro fünfzig Quadratmeter gefunden, das Knysna-Pferdchen *H. capensis* vor Südafrika in einer Dichte bis zu 2,2 Tiere pro zehn Quadratmeter. Diese spärliche Besiedlung einer Region mit Artgenossen erschwert die Partnersuche erheblich, zumal die Tiere keine besonders guten Schwimmer sind.

Darum reicht Kontrolle des Handels für den Schutz der Seepferdchen nicht aus. Mindestens genauso wichtig ist es, ihre Lebensräume zu schützen und, wenn möglich, zerstörte Habitate zu renaturieren. Und: Die Seepferdchen-Fischer müssen zumindest wissen, wie sie die Bestände ökologisch nachhaltig nutzen können. Mittelfristig wäre es besser, sie hätten alternative Einkommensquellen.

Auf den Philippinen, einem der Hauptexportländer für Seepferdchen, gehören Fischer wie Cesar Socias zu den ganz Armen. Er und seinesgleichen haben nicht einmal das Geld, um sich Netze für den Fischfang zu kaufen. Seepferdchen können sie dagegen von Hand einsammeln. Alles, was sie brauchen, ist ein gutes Lungenvolumen, um möglichst lange tauchen zu können, und gute Augen, um die Meister der Tarnung überhaupt zu entdecken.

Cesar Socias, ein Unterstützer des internationalen Seepferdchen-Projekts, lebt in Handumon, einem Dorf auf einer kleinen Insel, die der großen Insel Bohol vorgelagert ist. Die rund 850 Einwohner haben weder Strom noch fließendes Wasser; sie wohnen in Pfahlhütten mit Wänden aus geflochtenem Palmstroh. Die Menschen verzehren, was das Meer und der eigene Garten hergeben: Fisch und Muscheln, Kokosnüsse, Bananen und Papayas. Manche Dorfbewohner halten Hühner oder Hängebauchschweine. Auch von den zahlreichen umherstreunenden Hunden landet immer wieder einer im Kochtopf, um den Speiseplan mit tierischem Protein anzureichern. Nur Seepferdchen werden nicht gegessen, sondern verkauft. Vom Erlös wird Reis angeschafft, der zu jeder Mahlzeit gehört.

In Dorfversammlungen haben die Projektmitarbeiter die Fischer überzeugt, hochträchtige Seepferdchen – also Männchen mit sichtbar dicken Bäuchen – zu verschonen, damit sie ihren Nachwuchs

zur Welt bringen können, aus Sicht der Fischer die Beute von morgen. Das klingt einfacher, als es ist. Der Fischer, der unter Wasser ein trächtiges Männchen vor sich hat, muss sich nicht nur dafür entscheiden, auf den Geldwert dieses Tieres zu verzichten. Ihm sitzt auch die Angst im Nacken, erklärt Cesar Socias, dass sich später ein Kollege genau dieses Seepferdchen schnappt; dann wäre sein Verzicht umsonst gewesen.

Auswege aus dem Seepferdchen-Raubbau

Schon dieses Umdenken braucht Zeit und Geduld. Mittelfristiges Ziel ist aber, für die Fischer alternative Einkommensquellen zu organisieren. Dazu dienen Fisch- und Seegrasfarmen sowie das traditionelle Flechthandwerk. Die Alten unterrichten die Jungen in einer Technik, die in Vergessenheit zu geraten droht. Körbe, Matten oder Taschen werden inzwischen nicht mehr nur lokal vertrieben, sondern auch international – zum Beispiel über das Shedd-Aquarium in Chicago, einen Sponsor des Projekts. Seegras ist auf den Philippinen ein begehrter Rohstoff für die verarbeitende Industrie, als Zusatz zu Kunststoffen, Lebensmitteln oder Zahnpasta.

Damit sich das direkt vor Handumon liegende Korallenriff regenerieren kann, haben einheimische Biologen gemeinsam mit den Dorfbewohnern ein 33 Hektar großes Meeresschutzgebiet eingerichtet. Fischen ist dort verboten. Um zu verhindern, dass nachts Fischer von Nachbarinseln eindringen, wird es rund um die Uhr bewacht. Die hier lebenden Seepferdchen – meist Kuda- und Tigerschwanz-Pferdchen – sind allesamt registriert und ihr Wohlbefinden wird regelmäßig überprüft. Als ich den philippinischen Fischereibiologen Erwin Brunio auf einem Kontrolltauchgang begleite, fällt es mir schon leichter, die Tiere auf ihrer Koralle zu entdecken. Erwin hat eine Unterwassertafel dabei, auf der das Gebiet skizziert und in Planquadrate unterteilt ist. Jeder »Wohnsitz« eines Seepferdchens ist dort verzeichnet, und ortstreu, wie die Tiere sind, sitzen sie tatsächlich genau auf dem erwarteten Platz. Zur Identifizierung tragen sie winzige weiße Halsbänder mit Nummern; so sehen sie erst recht wie die gezäumten Rösser für Poseidons Kutsche aus. Zufrieden hakt der Mann von der Volkszählung die Unterwasserwohnsitze ab.

In den vergangenen Jahren haben sich die Seepferdchen-Bestände vor Handumon stabilisiert. Die Ideen des Projekts verbreiten sich in der Region. Mehrere Dörfer richteten Meeresschutzgebiete nach dem Vorbild von Handumon ein und weitere werden folgen. Die Menschen haben sich mit eigenen Augen davon überzeugt, was so ein Reservat bringt. Beim Schnorcheln vor Handumon, erzählt Erwin Brunio, staunen sie vor allem über die großen Fische im Schutzgebiet. »Wie habt ihr das geschafft?«, fragten sie. »Wissenstransfer«, davon ist Brunio überzeugt, »funktioniert am besten von Dorf zu Dorf.« In ein paar Jahren, so hofft er, kann Handumon seine Meeresressourcen ohne Hilfe von außen bewirtschaften. ◁

AUTORIN

Monika Rößiger ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.

Fetzenfische. Von Paul Groves. In: Spektrum der Wissenschaft 2/1999, S. 20.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

1953

Piccards Tauchversuche

Am 30. September hat Professor Piccard mit seinem neuen Tauchgerät »Trieste« den bisher bestehenden Tiefenrekord (2100 m) gebrochen und im Mittelmeer westlich von Neapel eine Meerestiefe von 3150 m erreicht. … Da der Druck im Meer auf je etwa 10 m Tiefe um 1 at zunimmt, beträgt er in dieser Tiefe mehr als 300 at … Sollten die Tauchversuche … schließlich bis auf 10 000 m Meerestiefe führen, so würde dort gar ein Druck von 1000 at herrschen. Gelegentlich hört man die Ansicht, daß infolge dieser ungeheuren Drucke die Stahlkugel gar nicht mehr weiter sinken könne. Das ist aber nicht richtig; denn … der Auftrieb der Kugel im Meerwasser ist in 10 000 m Tiefe praktisch derselbe wie unmittelbar unter der Oberfläche. *(Kosmos, 49. Jg., Heft 12, 1953)*

Ist Kaugummi gesund?

Ein gummikauender Mensch bietet nicht gerade einen ästhetischen Anblick, und vollends unerfreulich ist die Sitte, die ausgekauten Gummireste unter die Sitzflächen von Stühlen, unter Tischkanten usw. zu kleben … Es ist daher von hohem Interesse, daß jetzt von ebenso neutraler wie berufener Seite die Frage nach der Nützlichkeit oder Schädlichkeit des Gummikauens eingehend untersucht wurde. … Nach Prof. Korkhaus' Untersuchungen führt das Gummikauen zunächst zu einer beträchtlichen Steigerung der Speichelsekretion … Gleichzeitig erfährt aber auch der Chemismus des Speichels eine Änderung im Sinne der Pufferung. … Prof. Korkhaus kommt daher zu dem Schluß, daß … durch das Gummikauen nach 15–25 Minuten eine restlose Säuberung der Zähne und des Zahnfleisches bewirkt wird. *(Kosmos, 49. Jg., Heft 12, 1953)*

Leuchtender Handschuh für Motorradfahrer

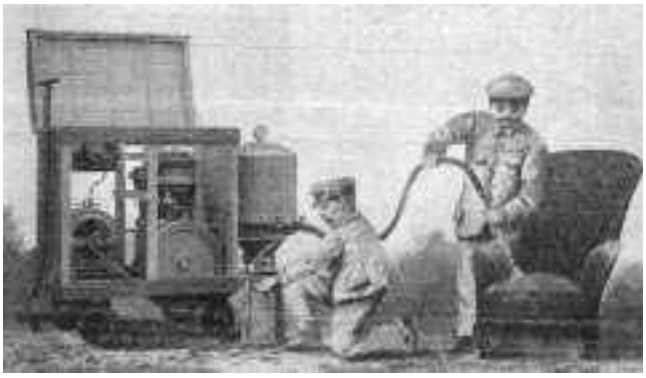
Wintermonate erfordern wegen der langen Dunkelperioden an Straßenkreuzungen ein besonders sorgfältiges Abwinken im Verkehr. … Ein heller Kopf ist nun auf den Gedanken gekommen, für diesen Fall Handschuhe mit einschließlich Mikro-Batterie eingebauten kleinen Abwinklampen zu verwenden. … Der Stromschluß erfolgt über einen zwischen Ringfinger und Daumen liegenden kleinen Schalter, der im einfachsten Falle nur aus zwei Kontaktstreifen zu bestehen braucht. Der … Leuchthandwinker hat gegenüber anderen Vorschlägen den Vorteil, daß das Zeichen nach hinten von dem Fahrer nicht verdeckt wird. *(Orion, 8. Jg., Nr. 23/24, 1953, S. 1008)*

▶ Wohin biegt er ab? Die Lampe im Handschuh verrät's.

Der erste Staubsaugerapparat

Da taucht nun zur rechten Zeit eine Erfindung auf, die wie mit einem Schlag alle die Schwierigkeiten, die sich einer rationellen Staubentfernung in den Weg stellen, wegräumt … Der Apparat besteht aus einer durch Motorbetrieb bewegten Luftpumpe, Filter sowie einer nach Belieben zu vergrössernden Anzahl drahtdurchzogener Gummischläuche, an deren Ende auswechselbar die metallenen Saugmundstücke angebracht sind. Sobald die Pumpe in Betrieb gesetzt wird, äussert sich begreiflicherweise eine sehr starke Saugwirkung im flachen Mundstück … ; durch einfaches Hin- und Herbewegen des letzteren über den zu reinigenden Gegenstand wird der … Staub aufgesaugt. *(Die Umschau, 7. Jg., Nr. 51, 1903, S. 1004)*

▼ Nichts für die Besenkammer: der erste Staubsauger



1903

Telegraphie des Hirns

Der amerikanische Elektriker Frederick Collins hat gezeigt, daß elektrische Wellen von hoher Frequenz … auf tierische und menschliche Gehirne vor und nach dem Tode einwirken. … Collins ist der Meinung, daß die elektrischen Wellen, indem sie die Neuronen … einander nähern oder voneinander entfernen, den vom Gehirn ausgehenden Nervenstrom schließen oder unterbrechen und in solcher Weise zu Öffnungs- und Schließungsextraströmen Veranlassung geben. … Collins' Experimente lassen es als durchaus nicht unwahrscheinlich erscheinen, daß zwischen Gehirn und Gehirn eine Gedankenübertragung ganz nach Art der Telegraphie ohne Draht stattfinden kann, indem das eine Gehirn Nervenwellen erzeugt, für welche das andere Gehirn als Empfänger dient. *(Der Stein der Weisen, Bd. 29, 1903, S. 396)*

Schnelle Berichterstattung

Mit den Schnellbahnen wetteifern die Zeitungsverleger im Schnelldruck und eine großartige Leistung ist neulich der Londoner Daily Mail gelungen. Die letzte Birminghamer Rede Chamberlains wurde dem Blatte durch das Elektrophon wörtlich übermittelt. Die Rede war um 10 Uhr 20 Minuten in London fertig aufgenommen und um 10 Uhr 32 Minuten fertig gedruckt. *(Journal für Buchdruckerkunst, 70. Jg., Nr. 44, S. 44, 1903)*

DIE EXTRASEITE NUR FÜR ABONNENTEN

Als Abonnent von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT kennen Sie bereits die Vorzüge unseres Magazins, doch gibt es noch einen weiteren Zusatznutzen für Sie:

WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE

NUR HIER **EXKLUSIVE ONLINE-ARTIKEL**

+ finden Sie jeden Monat einen Online-Artikel aus der spannenden Welt der Wissenschaft, der nicht im Spektrum-Monatsheft publiziert wurde.

NUR HIER **EXKLUSIVE PRODUKTE**

+ gibt es extra für unsere Monatsheft-Abonnenten Spiele und Produkte mit Pfiff wie den Heronsring.

Und seit November gibt es noch einen EXTRABONUS:

die kostenlose ONLINE-VERSION der BIOGRAFIE »Darwin« und des DOSSIERS »Die Evolution der Sprache«!

NUR HIER **EXKLUSIV: ONLINE-ARCHIV**

+ stehen Ihnen im Online-Archiv alle Artikel von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT seit 1993 im Volltext zur Verfügung.

EXKLUSIV FÜR ABONNENTEN

Für Abonnenten von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT ist bis zum 30. September 2004 die spannende Welt der Wissenschaft noch attraktiver! Denn unter **www.spektrum-plus.de** können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer einen Zugangspass ausdrucken, mit dem Sie bei folgenden Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhalten:
Deutsches Museum, Bonn / Botanischer Garten, Jena / Industriemuseum, Chemnitz / Deutsches Lokomotiv-Museum-Neuenmarkt, Kulmbach / Mathematikum, Gießen / Neanderthal Museum, Mettmann / Discovery-Channel IMAX-Theater, Berlin / Naturhistorisches Museum und Landessammlung für Naturkunde, Mainz / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Landesmuseum für Vorgeschichte, Dresden / Museum für Naturkunde, Berlin / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX DOME Filmtheater, Speyer / IMAX Classic Filmtheater, Speyer

SCHAUEN SIE DOCH EINFACH EINMAL AUF UNSERER SPEKTRUM-PLUS-SEITE IM INTERNET, WAS SIE ERWARTET.

Der Wein der Römer

Was schmeckte wem im Imperium? Wie produktiv war ein römisches Weingut? Französische Archäologen fanden Antworten im Selbstversuch.

Von Jean-Pierre Brun

Der französische Weingenuss hat eine lange Tradition: Schon zu Beginn des 1. Jahrhunderts v. Chr. konsumierten die Gallier davon reichlich, doch trotz dieser Vorliebe kam der Wein damals großteils aus Italien. Erst mit der Eroberung Galliens zu Beginn unserer Zeitrechnung änderte sich diese Situation: Um den wachsenden Bedarf in den Provinzen, insbesondere aber im wohlhabenden Rom selbst zu befriedigen, wurden im gesamten Mittelmeerraum Weinberge angelegt, so an den Küsten des tyrrhenischen Meeres und der Adria, im Gebiet des heutigen Barcelona, an der Küste bei Narbonne und im Rhone-Tal sowie im Nildelta, dem heutigen Tunesien und Algerien. Insbesondere die südfranzösischen Weingüter produzierten genug Überschuss, um sogar Rom selbst zu beliefern.

Drei Quellen informieren über die Techniken der Winzer, meist einheimische Gutsbesitzer: Texte, bildliche Darstellungen und archäologische Funde. Die erhaltene antike Literatur umfasst einige agronomische Werke, die unter anderem den Anbau der Reben und die Verarbeitung der Ernte behandeln. Die wichtigsten stammten aus der Feder von Marcus Pocius Cato (234–149 v. Chr.), Marcus Terentius Varro (116–27 v. Chr.), Lucius Iunius Moderatus Columella (etwa 100 – 60 v. Chr.), Caius Plinius Secundus (23–79 n. Chr.) sowie Rutilius Taurus Aemillianus Palladius (4. Jahrhundert n. Chr.). Auch Reliefs mit Darstellungen von Rebstöcken unterstützen die Aussagen dieser Texte. Archäologische Funde, Rekonstruktionen der alten Techniken und deren Erprobung in der Praxis helfen überdies, die materiellen Bedingungen der Weinproduktion in jener Zeit zu verstehen.

Im römischen Bürgertum gehörte Wein zu den privaten Mahlzeiten wie zu feierlichen Gelagen (ein altes Verbot, wonach angesehenen Frauen der Weingenuss verboten war, wurde gegen Ende der Republik, um 27 v. Chr., aufgehoben). Auf dem Kline genannten Liegemöbel ruhend genossen die Gäste je nach sozialem Rang verschiedene Qualitäten: Besonders bedeutenden Persönlichkeiten, die nahe dem Gastgeber zu Tische lagen, schenkten die Diener den beliebten Falerner ein, rangniedere mussten sich mit mittlerer Qualität zufrieden geben, etwa den Weinen aus Ligurien, denen ein bitterer Geschmack nachgesagt wurde.

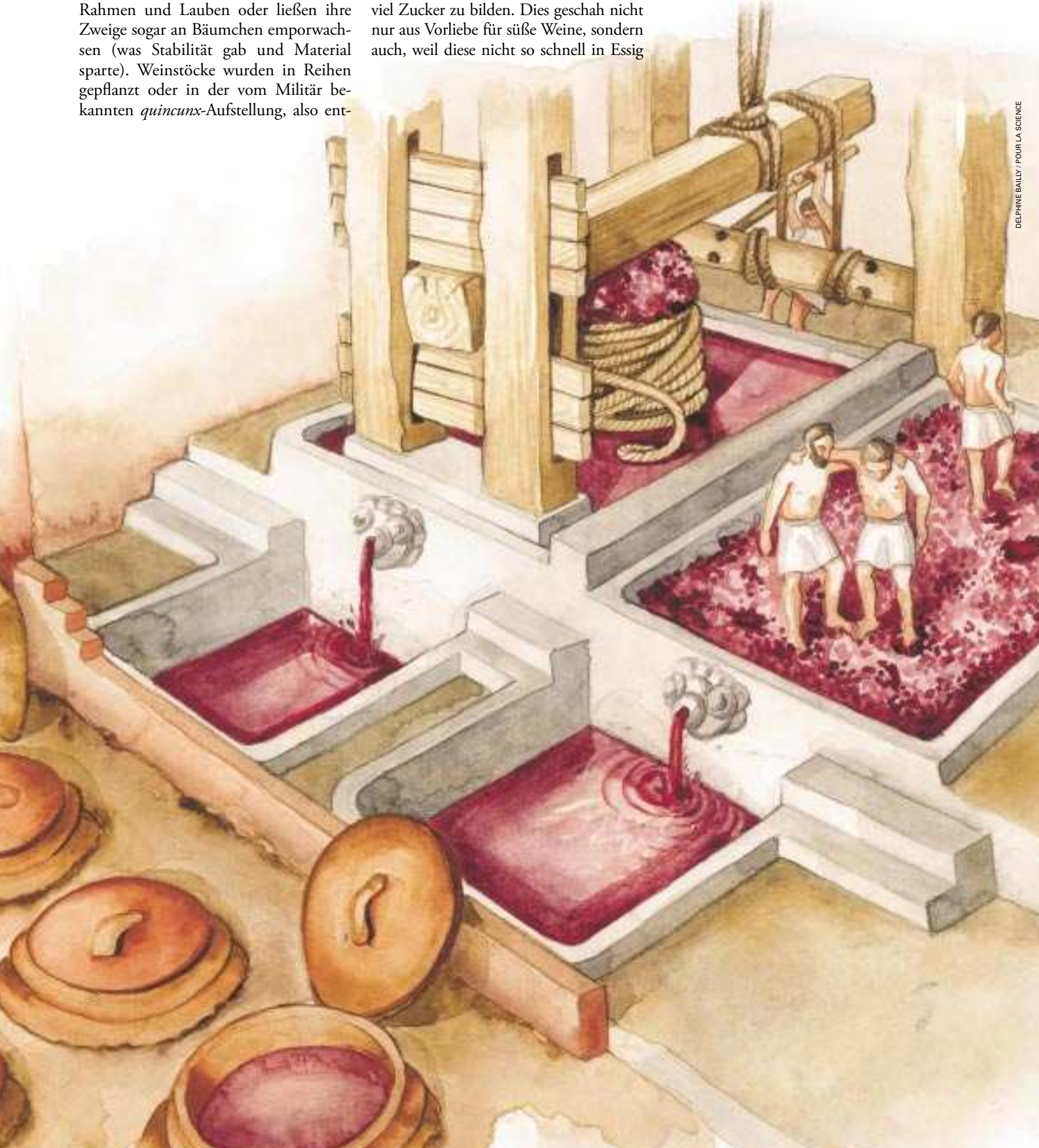
Das einfache Volk ging in die Tavernen und mischte sich dort mit Bettlern, Sklaven und Prostituierten. Solche Lokalitäten, in denen auch warme Mahlzeiten zu haben waren, gab es in den Städten zuhauf. Allein im bislang ausgrabenen Teil von Pompeji fanden sich mehr als hundert davon. Für wenig Geld erhielt man dort einen Wein der Region direkt aus einem Krug. Die Mauer einer Schänke in Pompeji verzeichnete die Preise: Ein Maß einfacher Wein kostete ein As, ein Maß Falerner das Vierfache. Die städtische Plebs suchte im Alkohol Trost, dementsprechend häufig gab es Streit und Prügeleien.

In seiner Abhandlung über die Landwirtschaft schlug Cato vor, für einfache Sklaven pro Jahr 260 Liter Wein einzuplanen. Der Pro-Kopf-Verbrauch der Stadtbewohner dürfte noch um einiges höher gelegen haben. Die Stadtverwaltungen in der republikanischen Zeit sorgten dafür, dass Lebensmittel, darunter auch der Wein, stets zu günstigen Preisen erhältlich waren.

Um Wein herzustellen, wurden die Trauben in einem Becken ausgetreten, der Saft konnte in ein tiefer gelegenes Becken abfließen. Anschließend gab man die Früchte in ein Tuch, wickelte ein Seil darum und verarbeitete sie mit einer Presse weiter. Ein zweites Becken nahm diesen Saft auf. Nach dem Einsetzen der Gärung wurde der Most in Gefäße umgefüllt, die bis zum Hals eingegraben waren. Schließlich goss man den Wein in Amphoren um, in denen er reifen konnte.

Manche römischen Winzer zogen ihre Reben auf dem Boden entlang – Columella empfahl diese Zuchtform in stürmischen Regionen. Andere pflanzten mehrere Stöcke so, dass sie, sich gegenseitig stützend, in Hecken und Büschen wuchsen, banden die Reben an Pfähle, Rahmen und Lauben oder ließen ihre Zweige sogar an Bäumchen emporwachsen (was Stabilität gab und Material sparte). Weinstöcke wurden in Reihen gepflanzt oder in der vom Militär bekannten *quincunx*-Aufstellung, also entsprechend dem Augenmuster der »5« auf einem Spielwürfel. Ein von Cato vorgeschlagener Modellhof umfasste 25 Hektar Anbaufläche und erforderte für den Betrieb16 Personen.

Geerntet wurde im September oder Oktober, um den Trauben Zeit zu geben, viel Zucker zu bilden. Dies geschah nicht nur aus Vorliebe für süße Weine, sondern auch, weil diese nicht so schnell in Essig umschlagen konnten (zwar war ein mit Wasser versetzter Essig als durstlöschendes Getränk weit verbreitet, brachte aber vermutlich geringeren Gewinn ein). Sollten zur Erntezeit Trockenheit und Hitze herrschen, empfahl Plinius einen Regen abzuwarten. Außerdem riet er zur Ge- ▷



DELPHINE BAILLY / POUR LA SCIENCE

▷ duld, bis der nächtliche Tau abgetrocknet sei. War die Zeit gekommen, sammelten Erntearbeiter die Trauben in Bottichen und Körben; ein Sarkophagdeckel aus Trier zeigt zwei Personen, die einen großen Korb mittels einer Stange tragen, ein Dritter schleppt einen kleineren auf dem Rücken.

Die weitere Verarbeitung erforderte im Prinzip keine sehr ausgefeilte Technik. Ihren Ursprung nahm sie im Nahen Osten des 4. Jahrtausends v. Chr. Dort wurden Trauben grob zerstampft und der Most in Gefäßen vergoren. Die Kulturen Mesopotamiens, Ägyptens sowie des hethitischen und des assyrischen Reiches haben das Verfahren weiterentwickelt. Um die Ausbeute zu steigern, wurden die Trauben mit den Füßen ausgetreten. In Palästina schlug man dazu entsprechende Vertiefungen in Stein, in Ägypten wurden Becken gemauert, auf Kreta und Zypern Becken aus gebranntem Ton hergestellt. Letztere standen auf einem Sockel, durch eine Öffnung konnte der Saft in Gefäße abfließen.

In römischen Weingütern leerte man die Trauben zunächst in einen gemauerten Tretbottich, von dem ein Abfluss in das Kelterbecken führte. Gelegentlich wurden sie direkt auf einem Sockel aus Kalk und gemahlenem Ziegel gestampft (dieses Material diente auch zur wasserdichten Auskleidung gemauerter Becken). Das Austreten sollte die Früchte aufbrechen und für die weitere Behandlung in einer Presse vorbereiten; diese stand unmittelbar daneben.

Das Luftbild zeigt die Grundmauern des Weinkellers der Villa »Des Toulon« in Rians (Departement Var). Vermutlich hatte dieser Keller einst 200 Gefäße enthalten.

JEAN-PIERRE BRUN

Vom Traubentreten zur mobilen Spindelpresse

Schon im Alten Reich Ägyptens (3. Jahrtausend v. Chr.) war das Ausquetschen der Maische, also des nach dem Austreten oder Stampfen übrig gebliebenen Breis aus Most und festen Bestandteilen üblich: Sie wurde in Tuch gefüllt und durch gegenläufiges Drehen von Stangen an jedem Ende ausgequetscht. Diese Technik war auch im Mittelmeerraum verbreitet. Erst ab dem 6. Jahrhundert v. Chr. kamen Pressen auf, wie sie bereits zur Gewinnung von Olivenöl in Gebrauch waren.

Diese Anlagen nutzten einen Holzstamm, den so genannten Kelterbaum, und eventuell ein daran befestigtes Gewicht (Kelterstein), um die im so genannten Presskorb eingefüllte Maische unter Druck zu setzen. Dieser Stamm war in einer Mauer oder in einem Holzpfosten gelagert. Ein Kelterstein konnte als Gegengewicht dienen, um den Stamm über ein Seil oder eine Haspel nach unten zu ziehen. Das Gewicht konnte aber auch mit Hilfe einer Spindel hochgeschraubt werden und drückte dann automatisch den Kelterbaum nach unten. Maschinen ohne einen solchen Stein erforderten mehr Muskeleinsatz.

Spindelpressen waren laut Plinius ab dem 3. Jahrzehnt v. Chr. in Gebrauch. Sie nahmen weniger Raum ein und erforderten kein ständiges Personal – Seil- und Haspelkeltern mussten auch des Nachts bedient werden. Schließlich entstanden auch Spindelkeltern, die nicht mehr über einen Baum, sondern direkt auf die Maische einwirkten (siehe Kasten Seite 90). Solche Maschinen konnten in einen hölzernen Rahmen eingebaut werden, um sie zu transportieren. Freilich haben sich von all diesen Maschinen keine Überreste erhalten, sondern nur indirekte Hinweise wie Aussparungen im Mauerwerk der Kelterhäuser oder Abdrücke hölzerner Teile im Boden. Dergleichen hat man zum Beispiel in der Villa Baptest in Montcrabeau (Departement Lot-et-Garonne) unter einem Mosaik des Spätantike (2.–5. Jahrhundert n. Chr.) entdeckt.

Anhand der antiken Texte, bildlichen Darstellungen und archäologischen Funde beschlossen Hervé Durand, Gutsherr im Weinbaugebiet Gard, André Tchernia von der École des hautes études en sciences sociales und ich selbst, einen römischen Weinkeller samt Presse nachzubauen und experimentell neue Erkenntnisse über die Verfahren der antiken Winzer zu gewinnen.

Die uns zur Verfügung stehende Halle ist nicht sehr breit, ließ also wenig Spielraum für Installationen. Unsere aus Eiche bestehende Presse, ein von Cato hinreichend genau beschriebenes und zu Anfang des Imperiums bereits sehr gebräuchliches Modell, befindet sich in der Mitte. Sie besteht aus zwei Pfosten von jeweils etwa 3,5 Meter Höhe und einem Kelterbaum von siebzig Zentimeter Durchmesser mit einer Länge von etwa 7,5 Metern. Damit lässt sich eine Kraft entsprechend einem Gewicht von 15 Tonnen ausüben. Neben der Presse steht das Becken zum Austreten der Trauben. Zwei weitere Becken nehmen jeweils den Saft auf, elf Weingefäße à fünfzig Hektoliter wurden im Boden versenkt.

Derartige Modelle hat man schon häufiger nachgebaut, doch die meisten dienen lediglich der Veranschaulichung. Auch die in Piesport an der Mittelmosel rekonstruierte Anlage wird zwar durchaus genutzt (siehe Bild rechts), nicht jedoch zur systematischen Untersuchung antiker Keltertechnik. Seit 1995 liefert unsere Anlage hingegen Jahr für Jahr

JEAN-PIERRE BRUN

Der Weinkeller der Villa Regina in Boscoreale (Italien) war beim Ausbruch des Vesuv im Jahre 79 n. Chr. verschüttet und dadurch gut konserviert worden. Die eingegrabenen Gefäße hatte man mit Deckeln aus gebranntem Ton verschlossen.

»römischen« Wein. Freilich kennt man die in der Antike verwendeten Sorten nicht – gleiche Namen bedeuten keineswegs auch die gleiche botanische Identität. Der Einfachheit halber verwerten wir deshalb den *Villard blanc* des Weinguts. Diese Rebe ist sehr widerstandsfähig, erfordert also kaum Maßnahmen gegen Schädlings- und Pilzbefall. Zudem liefert sie einen eher weichen, wenig aromatischen Wein. Das ermöglicht uns, auch die Zugabe von »Geschmacksverstärkern« nach den Ratschlägen Columellas auszutesten.

Unser Presskorb besteht, einer Beschreibung des Heron von Alexandria aus dem 1. Jahrhundert v. Chr. folgend, aus ineinander greifenden Holzelementen, die einen Kubus mit einem Meter Kantenlänge bilden. Diese »Kiste« steht auf dem Boden des Pressenbeckens und wird mit der Maische gefüllt. Bretter verschließen den Korb, darauf legt man wiederum Kelterklötze, die den Druck des Baumes auf das Brett und damit auf das Pressgut übertragen (siehe Bild rechts). Weil dessen Volumen im Laufe der Zeit abnimmt, wird der Korb sukzessive von oben nach unten abgebaut. Außerdem kann der Kelterbaum aus seiner Verankerung gelöst und in einer tieferen Position wieder eingesetzt werden.

Mit diesen Vorrichtungen gewinnen wir aus fünf Tonnen Trauben 16 bis 19 Hektoliter Most beim Austreten (im Mittel sind vier Personen etwa drei Stunden damit beschäftigt) sowie weitere 14 bis 16 Hektoliter während eines sechsstündigen Pressens.

Römische Winzer versuchten vor allem Weißweine wie den damals so beliebten Falerner zu produzieren und mussten deshalb unmittelbar nach dem Pressen die Schalen entfernen, etwa durch entsprechende Filterkörbe. Denn allein durch die Wärme der Umgebung begann der Traubensaft schnell zu gären, und die Schalen färbten den Wein rötlich – so entstanden Rosé, Clairet und noch dunklere Weine.

Unterhalb von Tretbottich und Presse lag der Weinkeller. In seinen Boden waren große Krüge bis zur Halsöffnung eingelassen worden. Der Traubensaft wurde über Rinnen hineingeleitet. Cato zufolge sollte solch ein Keller genug Gefäße für fünf Ernten haben. Viele Weingüter, insbesondere in der Provence und im Languedoc, hatten 200 bis 300 Behälter in ihren Kellern, von denen jeder im Mittel 15 Hektoliter fasste.

Dank unserer Experimente wissen wir nun, dass die Gärung in der römischen Technik auf natürliche Weise einsetzte, nämlich durch Hefen, die mit den Trauben in die Maische und damit in den Most gelangen. Vermutlich nach zwei Tagen hat man den Most in Behälter abgelassen und – unseren Versuchen nach – weitere zwei Tage fermentieren lassen. Dann wurden die Gefäße verschlossen, bis der Wein ausgereift und zum Verkauf bereit war. Das konnte bei großen Weinen einige Jahre dauern, beim Falerner bis zu 20 und beim Sorrentin sogar bis zu 25 Jahre. Einige Weine hat man auch mit anderen verschnitten: Solche, die bitter geworden waren, sollten das Reifen ▷

TH. ZÜHMER / RHEINISCHES LANDESMUSEUM TRIER

War der Presskorb mit Maische gefüllt, wurde der Kelterbaum mit Klötzen unterbaut (im Bild die Rekonstruktion in Piesport an der Mosel).

▷ junger Weine beschleunigen. Überdies schätzten die Römer einen »ranzigen« Geschmack, wie ihn Likörweine mit der Zeit annehmen. Ungeduldige und Betrüger erreichten ihn durch Zugabe sehr alter und konzentrierter Weine oder durch ein Erhitzen der Amphoren.

Dann wurde der gute Tropfen abgeschöpft oder -gepumpt. Manche Güter haben Amphoren für den Transport selbst hergestellt, andere erwarben die Tonwaren in Töpfereien. In Gallien kamen auch Holzfässer auf, die für den Fernhandel besser geeignet waren, da sie bei geringerem Gewicht ein größeres Volumen fassten. Die Römer übernahmen diese Technik und gaben einem Berufszweig seinen Namen: Der Küfer leitet sich von der lateinischen Bezeichnung *cupa* für Fass her. Vielerorts reifte der Wein auch in solchen Gebinden, so in Aquitanien, Germanien und wahrscheinlich auch im heutigen Burgund sowie in den Tälern von Rhone und Loire. Fässer standen in lang gestreckten Hallen auf Sockeln. Die waren vermutlich auch aus Holz, denn es gibt davon kaum Spuren. Eine Ausnahme ist die Villa Russi in Ravenna (Italien). In dem Weinkeller dieses Gutes findet der Besucher eine Reihe kurzer Pfosten entlang einer Mauer, die vermutlich zur Fixierung von Holzfässern gedient haben. In Feldlagern der römischen Armee am Rhein, an der Donau und in Großbritannien haben sogar Reste davon überdauert.

In verschiedenen Gebäuden in Italien und Gallien, aber auch in einem Wirtschaftsgebäude nordöstlich des Kelterhauses von Bad Dürkheim-Ungstein stießen Archäologen auf Einrichtungen, die offenbar dazu gedient hatten, den Traubensaft einzudicken. Man ließ ihn – laut Plinius – in Kesseln bei kleiner Flamme bis zu einem Drittel einkochen und erhielt den *sapa* genannten Sirup oder konzentrierte den Most sogar um die Hälfte zum *defrutum*. Bei dieser Gelegenheit kamen auch Gewürze und Früchte hinzu, zum Beispiel Quitten, Fenugrec (eine alte Fenchelart, die heute noch im Mittleren Osten als Gewürz geschätzt wird) und Iris (in Frankreich immer noch beliebt). *Defrutum* wurde als Zusatz verwendet, um den Alkohol- oder den Zuckergehalt zu steigern. Beispielsweise empfiehlt Columella, einen noch jungen Wein reifer wirken zu lassen, indem man auf zwei Urnen (26,26 Liter) eine geringe Menge *defrutum* untermischt, und zwar bei Wein aus den Ebenen etwa 0,8 Liter und bei dem gehaltvolleren Saft von Weinbergen gut 0,5 Liter. Ein höherer Zuckergehalt bremste auch Säurebakterien und damit ein Umschlagen in Essig – das Schwefeln kam erst im 18. Jahrhundert in Gebrauch. Allerdings ergaben sich so dicke Weine, die eher mit Wasser verdünnt getrunken wurden, eine Sitte, die schon bei den Griechen üblich gewesen war.

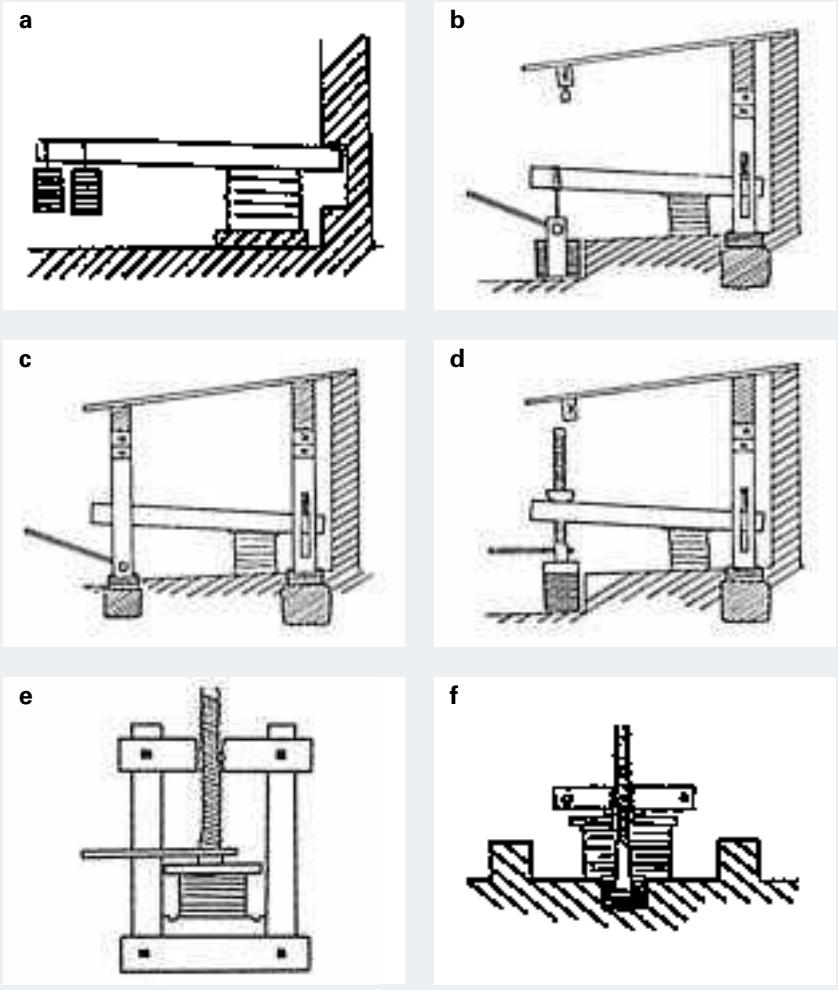
Harz und Teer – antike Konservierungsmittel

Weitere Kellerei-Maßnahmen waren das Entsäuern durch Zugabe von Kalziumkarbonat aus Gips oder Asche sowie das Filtern und Klären von Trübstoffen beispielsweise durch Tonerde. Um den Most schneller reifen zu lassen, haben ihn die Kellermeister auch erwärmt, etwa indem sie Amphoren in die Sonne stellten; mitunter wurde er zum gleichen Zweck geräuchert.

Mit Beginn der Fermentation wurden »Konservierungsmittel« hinzugegeben, das waren neben *defrutum* auch

Vom Hebel zur Spindel

Im Laufe der Jahrhunderte entwickelten die antiken Handwerker verschiedene Pressentypen. Dienten anfangs noch Gegengewichte dazu, den Pressenbaum auszubalancieren (a), wurden sie bald durch ein entsprechendes Fundament ersetzt (b). Ein Hebel, einem Wagenheber vergleichbar, bewegte den Baum. Später fixierte man ihn an einem zweiten Pfosten (c) und schließlich wurde dieser Hebel durch eine Spindel ersetzt (d). Ab dem 1. Jahrhundert n. Chr. gab es solche Pressen auch in transportablen hölzernen Rahmen (e), darin bewegten sie nicht mehr einen Pressenbaum, sondern wirkten direkt auf die Trauben. Solche Maschinen wurden dann auch fest im Boden verankert (f).



JEAN-PIERRE BRUN

JEAN-PIERRE BRUN

Der Autor und seine Kollegen haben diese Kelter nachgebaut, um die römische Weinherstellung im Experiment zu untersuchen. Das Bild zeigt den mit Seilen betätigten Kelterbaum, darunter den Presskorb, in den die Maische eingefüllt wird. Dieser Korb wird im Zuge des Pressens nach und nach abgebaut.

Harze verschiedener Bäume oder Erdpech, ein pflanzlicher Teer, der durch Destillation aus harzhaltigem Holz gewonnen wurde. Beide Substanzen haben eine antiseptische Wirkung. Darüber hinaus sollten sie dem Wein aber auch einen angenehmen Geruch verleihen oder zumindest stechenden Essiggeruch überdecken. Ein solches Harz enthält Terebenthin-Öl, das sich in Alkohol löst und einen charakteristischen Geschmack verleiht, wie man ihn heute beim griechischen Retsina findet. Erdpech hingegen gab eine rauchige Note, die uns heute wohl kaum schmecken würde, damals aber sehr geschätzt war. Es diente vermutlich überdies dazu, die Amphoren und Krüge aus gebranntem Ton abzudichten beziehungsweise auszukleiden. Unsere Experimente legen nahe, dass das jedes Jahr aufs Neue geschah, wie auch Columella von dieser Tätigkeit so schreibt, als sei sie keine einmalige Angelegenheit gewesen. Auf diese Weise erhielt der Wein aber auf jeden Fall einen etwas rauchigen Geschmack.

Eine weitere Zutat war Salz, oft in Form abgekochten Meerwassers, weil es ebenfalls antiseptisch wirkte und zudem den Wein klärte – manche gelösten Verunreinigungen fielen daraufhin aus. Sollte dem Wein Säure fehlen, beispielsweise auf Grund der späten Ernte, half Gips dem ab; das Verfahren war unter anderem in Italien und Tunesien sehr beliebt.

All diese Zugaben erfolgten unserer Meinung nach in den wenigen Tagen bis zum Verschluss der Keltergefäße. Wir haben auch Gewürze getestet, die antiseptisch wirken, aber auch aromatisieren sollten – so den aus dem Orient stammenden Fenugrec, eine Fenchelart. Man verwendete nur ihre äußeren Blätter. Damit gewürzter Wein schmeckte reifer. Andere Stoffe sollten den vorhandenen Geschmack verstärken oder die Schwächen des Weins maskieren, seien es Iris, Borstengras oder Schilfgras. Einige veränderten den Geschmack so stark, dass man von Spezialweinen sprechen kann, vergleichbar heutigen Aperitifs oder Digestifs. Plinius listete nicht weniger als 66 solcher Zutaten auf, darunter Raute und Spargel, Schilfrohr und Enzian. Solche Weine spielten eine große Rolle in der antiken Pharmakologie, sie galten als Stärkungsmittel oder Medizin.

Geschmacklich erinnern die von uns gekelterten Weine an den spanischen Jerez und an die gelben Weine des Jura. Wie Letztere erinnern ihre Aromen an Trockenfrüchte und Nüsse. Hinzu kommen Aspekte des modernen Retsina. Vermutlich fänden sie kaum die Zustimmung heutiger Gaumen. Doch jede Epoche hatte wohl ihren eigenen Geschmack: Cäsar oder Cicero hätten vermutlich weder einen Château-Margaux noch einen australischen Chardonnay sonderlich geschätzt. ◁

Jean-Pierre Brun ist Direktor des Centre Jean Bérard in Neapel. Die Redaktion dankt Karl-Josef Gilles vom Rheinischen Landesmuseum Trier für fachliche Unterstützung.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Zu Tisch bei den alten Römern. Von Gudrun Gerlach. Konrad Theiss Verlag, 2001.

Bacchus und Sucellus. 2000 Jahre römische Weinkultur an Mosel und Rhein. Von Karl-Josef Gilles. Rhein-Mosel-Verlag 1999.

Le vin et l'huile dans la Mediterranée antique, viticulture, oléiculture et procédés de transformation. Von Jean-Pierre Brun. Paris, Errance 2003.

La viticulture antique en Gaule. Von Jean-Pierre Brun und F. Laubenheim in: Gallia, Heft 51, S. 1, 2001.

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

NACHHALTIGKEIT

Ein blasser Geist

Als Unternehmensstrategie ist Nachhaltigkeit in der Wirtschaft beliebt. Doch an einer glaubwürdigen Umsetzung mangelt es meist.

Von Antje Kahlheber

Mit wehenden Locken eilte Professor Wippermann nach der Tagung des Forums für nachhaltige Entwicklung zum Taxi. Da bemerkte er sein Namensschild am Revers. »Hier, nehmen Sie das«, sagte er zum Portier. »Es geht schließlich um Nachhaltigkeit, und das kann man nächstes Jahr wieder verwenden.« Sprach's und verschwand. Der verdutzte Portier stand auf und entsorgte das Schild. In den Mülleimer.

Gehört der junge Mann vielleicht zu den 72 Prozent der Deutschen, denen der Begriff Nachhaltigkeit immer noch nichts sagt? Verwunderlich ist es nicht. Lässt doch die Definition der Brundtland-Komission von 1987 viel Interpretationsspielraum: »Nachhaltige Entwicklung soll die Bedürfnisse der heutigen Generationen befriedigen, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen.« Der Weltgipfel von Rio erkor die Nachhaltigkeit fünf Jahre später als Zielvorgabe für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Doch in Wirtschaftskreisen wird »Nachhaltigkeit« ähnlich nebulös benutzt wie »Corporate Accountability« oder »Total Quality Management«.

Immerhin haben sich auf internationaler Ebene Unternehmen organisiert, die sich nachhaltige Entwicklung auf die Fahne schreiben. Der vom UNO-Generalsekretär Kofi Annan initiierte »Global Compact« hat sich zum Ziel gesetzt, Umwelt- und Sozialstandards in der Unternehmenspolitik freiwillig zu beachten und exemplarische Lösungen für eine gute Praxis zu entwickeln. Er dient als Vorbild für nationale Zusammenschlüsse. Vor drei Jahren ging aus dem Umweltausschuss des Bundesverbands der deutschen Industrie das »econsense-Forum für nachhaltige Entwicklung« hervor. Seine 24 Mitglieder rekrutieren sich aus global operierenden Unternehmen, von der Allianz über Siemens bis zu Volkswagen. Im Dialog mit Wirtschaft, Politik und anderen Interessensvertretern wollen sie Konzepte erarbeiten, wie eine Balance sozialer, ökologischer und ökonomischer Ziele zu erreichen ist.

Aber wie ernst sind ihre Bemühungen zu nehmen? Wird da ein Scheindialog mit der Öffentlichkeit geführt und mit Symbolhandlungen gepunktet? Oder sieht die Wirtschaft letztlich ein, dass Gewinnmaximierung nicht so wichtig ist wie der Erhalt des Universums?

Josef Reichholf, Professor für Naturschutz und Gewässerökologie an der Technischen Universität München, meint, dass eine ernsthafte Auseinandersetzung stattfindet: »Die Unternehmen bemühen sich, und es sind ja nicht gerade unwichtige Unternehmen.«

Schon jetzt ist es schwierig, einen Überblick über die Nachhaltigkeitsaktivitäten der Konzerne zu bekommen. In der econsense-Veröffentlichung »Nachhaltigkeit konkret« erfährt man mehr. Die dort aufgeführten Beispiele sollen zeigen, dass sich Nachhaltigkeit rechnet. Allerdings wirkt es etwas lächerlich, wenn ein Großkonzern wie Bayer sich brüstet, »fast zwei Dutzend Computer« an brasilianische Schulen und 2400 Portionen Suppe an Slum-Kinder auszugeben. Im gleichen Zeitraum starben 24 Kinder in den Anden an Bayers Pestiziden. Weil diese aussahen wie Milchpulver.

Manche Firmen versuchen immerhin, ihre Arbeits- und Produktionsprozesse umzustrukturieren. Der Chemieriese BASF verteilt zwar immer noch gesundheitsgefährdende Chemikalien wie Phtalate (Weichmacher) rund um den Globus, hat aber eine bemerkenswerte Ökoeffizienzanalyse entwickelt, mit der das Unternehmen seine Produkte strenger unter die Lupe nehmen will. Die Autohersteller BMW und VW basteln an Wirkungsgraden, Wasserstoffantrieb, Brennstoffzellen und nachwachsenden Rohstoffen. Daimler-Chrysler setzt in Brasilien angebaute Materialien wie Kokosnuss, Hanf, Sisal oder Flachs im Fahrzeuginnenbau ein. Wobei die biologischen Verbundmaterialien aber mit einer Kunststoffschicht überzogen werden: Denn welcher Fahrer mag schon Hanfgeruch in seinem Wagen?

Beratung und Zielführung erforderlich

So liegt manchmal der Bezug zur Nachhaltigkeit im Verborgenen: »Die Risiken der Gewinnung von Primärenergie durch Kernspaltung können durch Ausbau beziehungsweise Neubau von Kraftwerken nach dem neuesten Stand als beherrschbar bezeichnet werden«, erfährt der erstaunte Leser im Dialogpapier von econsense. Mindestens neun der 24 Unternehmen sind direkt oder indirekt an der Erzeugung von Kernenergie beteiligt. »Ich hoffe, dass beim Thema Klimawandel nicht alles auf die Atomkraft hinausläuft«, sagt Reichholf. »Angesichts der einseitigen Konzentration auf die Klimadiskussion könnte ein Biologe aber schon trübsinnig werden.«

Umweltmanagement ist inzwischen bei fast allen großen Unternehmen Bestandteil des Wettbewerbs geworden. In Deutschland sind derzeit 2364 Firmen im Besitz eines Umweltzertifikats nach dem Europäischen Umwelt-Audit, 3820 Unternehmen nach der internationalen ISO 14001. Dagegen sieht es in Bezug auf Nachhaltigkeit noch kläglich aus: Im vergangenen Jahr wurden weltweit nur

etwa 180 Nachhaltigkeitsberichte geschrieben. Nicht einmal jedes der econsense-Unternehmen publizierte einen. »Es fehlt einfach noch an wissenschaftlicher Beratung und Zielführung«, sagt Reichholf. Bei der Bewertung der Berichte sind Wirtschaftsprüfer am Werk. Und die beurteilen zwar die Korrektheit der Angaben, nicht aber die Maßnahmen selbst. Wie auch, wenn Kennzahlen zur Nachhaltigkeit fehlen?

Gegen Regulierungen wehrt sich econsense aber mit Händen und Füßen, obwohl das der Glaubwürdigkeit zuträglich wäre: »Nachhaltigkeit ist ein Feld für Kreativität und Innovation, das bei gesetzlichen Standards nicht gedeiht.« Allerdings seien die ökologischen Anforderungen der Nachhaltigkeit nur zu erfüllen, »wenn geeignete wirtschaftliche Grundlagen und entsprechende soziale Rahmenbedingungen existieren«. »Wie viel Staat darf es sein?«, fragt da der Vorsitzende des Netzwerks Wirtschaftsethik, Albert Löhr: »Auf der einen Seite fordern Unternehmen, der Staat habe die Rahmenbedingungen zu schaffen, auf der anderen Seite soll er sich aber bitte schön nicht einmischen.«

»Als Vertreter einer Nichtregierungsorganisation sehe ich den Ansatz der Selbstverpflichtung und des privaten Engagements positiv«, meint Reichholf, der auch im Stiftungsrat des WWF aktiv ist. »Nach anderthalb bis zwei Jahren müsste allerdings von außen überprüft werden, ob die angestrebte Wirksamkeit auch erreicht wurde.«

Dabei gibt es sie tatsächlich, die vorbildlichen Beispiele. Unternehmen wie Höchst, Puma oder Otto-Versand lassen sich freiwillig von Umweltschützern in die Karten schauen und arbeiten mit ihnen an neuen Konzepten. Sogar Greenpeace lobt den Einsatz mancher Unternehmen, wie beispielsweise der Münchner Rückversicherung, für Klimaschutz und mehr Nachhaltigkeit auf allen Unternehmensebenen. »Im Vergleich zu Verkehr und Privathaushalten hat die Wirtschaft insgesamt am meisten für den Umweltschutz getan«, sagt Reichholf.

Im letzten Jahrzehnt gingen Rohstoff- und Energieverbrauch um etwa 0,4 beziehungsweise 0,3 Prozent pro Jahr zurück. Die Luftemissionen sanken um 6,5 Prozent bei den Luftschadstoffen und um 2,1 Prozent bei den Treibhausgasen. Zwar reduzierte die Industrie den Kohlendioxidausstoß um 1,3 Prozent jährlich, der größte Rückgang war aber durch die Schließung veralteter Industrieanlagen in den neuen Bundesländern zu verbuchen. Für die Zielvorgabe der Regierung reicht das freiwillige Engagement bezüglich Kohlendioxidemission, Energie- und Flächenverbrauch leider nicht.

DAIMLER-CHRYSLER

Etwa fünfzig Bauteile der Mercedes-Benz-E-Klasse werden aus Naturfasern wie Hanf und Sisal hergestellt.

Ein wichtiger Wirtschaftszweig ist im econsense-Forum überhaupt nicht vertreten: die Landwirtschaft. Durch Schaffung von Monokulturen, Einsatz von Pestiziden und Vernichtung tropischer Wälder für Rinderweiden und Futtermittelanbau übersteigt ihre Umweltschädigung die der Industrie um ein Vielfaches. »In Deutschland ist die Landwirtschaft für siebzig Prozent des Artenrückgangs verantwortlich, die Industrie gerade mal für vier Prozent«, erklärt Reichholf. »Die weltweiten Brandrodungen belasten die Atmosphäre genau so stark durch Treibhausgase wie die gesamten Emissionen der deutschen Industrie.«

Die Viehhaltung verursacht bei weitem die größte Umweltverschmutzung: Nach Reichholfs Berechnungen machen die aus der Massenhaltung stammenden Gülle- und Mistmengen mehr als das Dreifache der menschlichen Abwässer aus. Sie gelangen ungeklärt auf die Felder, überdüngen Böden und Flüsse. Das freigesetzte Methan aus den Verdauungsvorgängen der Wiederkäuer übertrifft die klimaschädigende Wirkung des gesamten Kraftfahrzeugverkehrs erheblich. Allein in Deutschland leben 43 Millionen Huftiere, dies ist nur durch Futtermittelexporte aus Entwicklungsländern möglich. »Nachhaltigkeit müsste bedeuten, dass in einem Gebiet nur so viel tierische Produktion zulässig sein darf, wie dieses selbst tragen kann – ohne Zufuhr von außen«, fordert Reichholf.

Ob in der Industrie oder in der Landwirtschaft: Es ist die wachstumsorientierte Herangehensweise, die so viel Zerstörung anrichtet. Die Grenzen des Wachstums will die Wirtschaft nicht wahrhaben. Nun setzt sie auf effizientere Nutzung der Ressourcen. So sind bei Unternehmen die Grenzen der Nachhaltigkeit schnell erreicht. Dass Nachhaltigkeit letztlich einen Rückgang im absoluten Konsum, ein Absenken der Stoff- und Energiedurchsätze besonders in den zu viel konsumierenden Industriestaaten bedeuten muss, wird hartnäckig übersehen. Solange die globalen Konzerne aber unter dem Druck stehen, schnelle Gewinne für die Teilhaber zu erwirtschaften, wird man eine erhaltende Wirtschaftsweise nicht verwirklichen können. Solange Konsumzurückhaltung und stagnierendes Wachstum zu Panikattacken in den Führungsetagen führen, bleibt das Wesen der Nachhaltigkeit ein blasser Geist. Und so lange ist es auch nicht verwunderlich, dass die Wippermanns dieser Welt nicht merken, dass die Gesellschaft sie nicht versteht. ◁

Antje Kahlheber ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

INTERVIEW

»Noch sind es nicht viele Firmen«

Albert Löhr, Professor für Sozialwissenschaften am Internationalen Hochschulinstitut Zittau und Vorsitzender des Deutschen Netzwerks Wirtschaftsethik, bezieht Stellung zu den Nachhaltigkeitsverpflichtungen von Unternehmen.

Spektrum der Wissenschaft: Immer mehr Unternehmen verpflichten sich in ihren Leitlinien freiwillig zu mehr sozialer Nachhaltigkeit. Warum?

Albert Löhr: Wir haben lange vom guten Einvernehmen zwischen Wirtschaft und Gesellschaft aus der Nachkriegszeit gezehrt. Das ist in den Zeiten der Globalisierung vorbei. Wenn Unternehmen soziale Probleme nicht meistern, fragwürdige Arbeitsbedingungen und zu wenige Arbeitsplätze stellen, geht ihre gesellschaftliche Akzeptanz, die *license to operate*, verloren. Zusätzlich führen permanente Umstrukturierungen und Unternehmensfusionen zu Sinnkrisen bei den Mitarbeitern. Sie sind nicht mehr motiviert, ihr Bestes zu geben, es herrscht Arbeitsverdrossenheit. Und schließlich verlieren Unternehmen, die nicht nachhaltig in die Aus- und Weiterbildung ihre Mitarbeiter investieren, ihre Konkurrenzfähigkeit.

Spektrum: Im Vergleich zu ökologischen Zielen stehen soziale Ziele in der Nachhaltigkeitsdebatte der Unternehmen aber meist im Hintergrund.

Löhr: Ökologische Themen sind viel leichter fassbar. Wenn der Fluss plötzlich rot ist oder Rauchschwaden am Himmel ziehen – das sieht man. Die sozialen Grundlagen des Wirtschaftens verschwinden aber eher schleichend. Arbeitslosigkeit entwickelt sich über viele Jahrzehnte. Es dauert, bis solche Prozesse als gesellschaftliches Problem formuliert werden, dem auch Politik und Wirtschaft nicht mehr ausweichen können.

Spektrum: Ist es noch glaubwürdig, wenn Unternehmen sich zur Nachhaltigkeit bekennen, gleichzeitig aber soziale und ökologische Probleme verursachen?

Löhr: Glaubwürdig sind Unternehmen für mich dann, wenn sie sich ernsthaft auf den Weg machen und nicht bei der Formulierung von Zielvorgaben und Leitlinien stehen bleiben. Man kann allerdings auch von einem internationalen Großkonzern nicht erwarten, dass er von heute auf morgen eine weiße Weste und keine ökologischen Probleme mehr hat – das wäre unfair. Aber Probleme müssen zugegeben, diskutiert und angegangen werden. Glaubwürdigkeit muss schrittweise erworben werden, das funktioniert nicht zu einem Stichtag.

Spektrum: Deshalb brauchen Unternehmen Kontrolle – um glaubwürdiger zu werden. Reichen da unverbindliche Selbstverpflichtungen?

Löhr: Bei global wirkenden Unternehmen gibt es zurzeit keine Alternative, denn auf eine Welt-Gesetzgebung mit rechtsverbindlichen Standards kann man lange warten. Unternehmen müssen sich ihre Glaubwürdigkeit daher weitgehend selbst durch überzeugende positive Beispiele verdienen. Die kritische Öffentlichkeit als wirksame Kontrolle wird dabei immer noch maßlos unterschätzt. Wenn sich Unternehmen mit Leitlinien und Nachhaltigkeitsberichten brüsten, ist das wie ein großes rotes Tuch für Nichtregierungsorganisationen (NGOs) wie Greenpeace oder Attac. Wenn Selbstverpflichtungen nicht eingehalten werden, verbreiten diese das in der Öffentlichkeit. Zunächst über Plattformen im Internet und schließlich durch medien- und publikumswirksame Kampagnen.

Spektrum: Die Unternehmen rechnen also damit, dass die Gesellschaft ihre Aufgabe wahrnimmt und Kontrolle ausübt. Ist das nicht ein bisschen viel verlangt von oft ehrenamtlichen oder von Spenden finanzierten Mitarbeitern der NGOs?

Löhr: Für die Zukunft ist vorstellbar, dass unabhängige professionelle Institutionen zur Überwachung geschaffen werden, auf die sich Staat, Unternehmen und NGOs einigen. Die derzeitige Diskussion in den Unternehmen beschäftigt sich bereits damit, neuartige Überwachungssysteme nachhaltigen Wirtschaftens zu entwickeln. Puma beispielsweise unterhält eigens neun Mitarbeiter, die zu den Produktionsstandorten weltweit reisen und die Einhaltung von Umwelt- und Sozialstandards überprüfen. Kritiker fordern, dieses interne Monitoring durch externe Überwachungssysteme zu ergänzen. Tatsächlich geht momentan eine kleine Welle los, dass Unternehmen Hand in Hand mit NGOs arbeiten, die Unternehmensaktivitäten auch extern überwachen.

Spektrum: Zum Beispiel?

Löhr: Noch sind es nicht viele. Hess Natur hat Aktivisten von Clean Clothes gebeten, seine Produkte unter die Lupe zu nehmen, der Otto-Versand Greenpeace.

Spektrum: Sollten die Unternehmen nicht Standards schaffen, die einen Vergleich von und einen Wettbewerb um Sozialverträglichkeit zwischen den Unternehmen ermöglichen?

Löhr: Ich rechne mit sinnvollen Standards auf der Branchenebene. Bei einzelnen Branchen wie den Spielzeugherstellern, der Chemischen Industrie oder der Sportartikelindustrie funktioniert das auch schon ganz gut. Was über diese Branchenebene hinausgeht, ist zu allgemein gehalten. Absichtserklärungen für mehr Nachhaltigkeit müssen aber in jedem Falle heruntergebrochen werden, im Idealfall bis auf die Unternehmensebene, damit der Mitarbeiter weiß, was er für die Nachhaltigkeit des Betriebs leisten muss.

Spektrum: Viele Unternehmen reiten nur symbolisch auf der Nachhaltigkeitswelle mit, um mit ihr zu werben. Wie kann der Laie die Spreu vom Weizen trennen?

Löhr: Wenn große Unternehmen kleine Geschenke an die Gesellschaft machen, hat das oft nichts mit Nachhaltigkeit zu tun. Sponsoring für Schulen und Kindergärten ist zwar ganz nett für das soziale Umfeld, aber für nachhaltiges Wirtschaften belanglos. Interne Geschäfts- und Managementtechniken werden davon nicht berührt. Erst wenn die Ebene der Arbeits- und Produktionsprozesse erreicht ist, wenn Unternehmen beispielsweise die Ökoeffizienz und Sozialverträglichkeit ihrer Produkte von der Entstehung bis zur Entsorgung verfolgen, ist die Dimension der Nachhaltigkeit erreicht. Da muss man genau hinschauen, welche Tragweite ein einzelnes Projekt hat. ◁

Das Interview führte **Antje Kahlheber**.

SOZIALFORSCHUNG

Familie im Wandel

Mit dem Zusammenbruch der DDR prallten zwei soziale Systeme aufeinander. 13 Jahre nach der Wiedervereinigung haben die Familiensysteme in Ost und West noch immer keinen Mittelweg gefunden.

Von Nardine Löser

Das Jahr der deutschen Wiedervereinigung markiert auch für die demografische Forschung eine Wende. Manche Wissenschaftler dachten, der Einfluss der ehemaligen DDR würde die traditionelle Familienform Westdeutschlands durchbrechen, die der Frau die Rolle der Mutter und Hausfrau zuweist und dem Vater jene des Ernährers. Für eine ostdeutsche Frau war es völlig normal und sozial anerkannt, in jungen Jahren ein Kind zu bekommen, ohne verheiratet zu sein. Doch bis heute scheinen sich die unterschiedlichen Familienformen nicht anzunähern.

In den ersten Jahren nach der Wende zeigten sich zwar auch innerdeutsche Gemeinsamkeiten. Doch waren sie für die demografische Situation überwiegend negativ: Die jährliche Geburtenzahl sank, während das mittlere Alter der Frau bei der Erstgeburt stieg.

Bereits 1980 war die Geburtenzahl in Deutschland rückläufig: 865 000 Kinder, fast 50 000 weniger als im Jahr zuvor. Im Jahr 2000 wurden 770 000 Kinder in der Bundesrepublik geboren, davon nur etwa 111 000 in den neuen Bundesländern und Ostberlin. Für eine Frau in den alten Bundesländern bedeutet dies, im Schnitt 1,4 Kinder zur Welt zu bringen, während ihre ostdeutsche Nachbarin nur 1,2 Kindern das Leben schenkt. Damit unterschreitet Deutschland deutlich die Schwelle von 2,1, die für eine konstante Bevölkerungszahl nötig wäre.

Anders als in den alten Bundesländern brachen in der ehemaligen DDR in den ersten Jahren nach der Wende die Geburtenzahlen drastisch ein. So wurden dort 1991 über 70 000 Geburten weniger registriert als im Jahr zuvor. Neben der verstärkten Abwanderung und der gestiegenen Arbeitslosigkeit begründeten Sozialforscher den massiven Rückgang mit einem »demografischen Schock«, den die Ostdeutschen durch den politischen und sozialen Wandel erlitten. Denn mit der Wiedervereinigung fehlte plötzlich die familienfreundliche Bevölkerungspolitik, die sich in zahlreichen Vergünstigungen und Förderungen für junge Eheleute und Eltern niedergeschlagen hatte. So fiel zum Beispiel das zinslose Darlehen weg, dessen Rückzahlungshöhe mit der Anzahl der Kinder abnahm, ebenso Wohnungsbeschaffung und Mietzuschuss.

Trotz des gravierenden Geburteneinbruchs, der seit 1995 mit langsam steigenden Geburtenraten abgemildert wird, sind die ostdeutschen Mütter bei der Geburt des ersten Kindes weiterhin jünger als Mütter in Westdeutschland. Während sich die Frauen in den alten Bundesländern 1989 mit fast 27 Jahren auf Nachwuchs freuten, waren ihre Nachbarinnen im Osten mit 23 deutlich jünger.

Mittlerweile macht das Ost-West-Gefälle nur noch zwei Jahre aus, da das Alter der Mütter bei der Geburt des ersten Kindes in den neuen Bundesländern stärker ansteigt als in den alten. Die Bereitschaft zur früheren Familiengründung bei ostdeutschen Paaren hängt, so vermuten Sozialforscher, mit dem zum Tragen kommenden ostdeutschen Lebensentwurf zusammen, in dem »Kind und Familie« wesentliche Bestandteile geblieben sein müssen.

Unterschiedliche Lebensentwürfe

Dies scheint tatsächlich der Fall zu sein. Neue Analysen am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock zeigen, dass Arbeitslosigkeit und instabile Beschäftigungsverhältnisse nicht zwangsläufig zu einem Aufschub der Familiengründung beigetragen haben (siehe auch Interview auf Seite 98). So sind es gerade Frauen mit schlechten Erwerbschancen, die sich früh für eine Elternschaft entscheiden. Selbst die Arbeitsmarktsituation des Partners, und das überrascht vor allem im Vergleich zu westdeutschen Männern, spielt laut so genannter Lebensverlaufstudien beim ersten Kind keine Rolle. Die finanzielle Grundlage scheint demnach dem ostdeutschen Kinderwunsch zu unterliegen und kann verbunden mit der Arbeitslosigkeit nicht als Hauptursache für den nach der Wende einsetzenden Geburtenrückgang gelten.

Anders als im Westen Deutschlands wird das Kind nicht als hinreichender Grund für die Mutter angesehen, zu Hause zu bleiben. Vielmehr versuchen die jungen Frauen, so schnell wie möglich in das Berufsleben zurückzukehren oder im Falle der Erwerbslosen Arbeit zu finden. Die für die ehemalige DDR typische Vereinbarkeit von »Kind und Beruf« ist vor allem durch die vergleichsweise gute Versorgung mit Betreuungsplätzen für Kinder gegeben. Nach der Wende fielen zwar die Vergünstigungen der Frau wie bezahlte Hausarbeitstage,

DPA

In welchem Alter sich Frauen für ihr erstes Kind entscheiden, hängt auch davon ab, wie sie Beruf und Familie vereinbaren können. Ganztagsbetreuung der Kinder spielt hier eine wichtige Rolle.

CORBIS

Statistisch gesehen bringt eine Frau in den neuen Bundesländern 1,2 Kinder zur Welt, in den alten Bundesländern 1,4.

spezielle Arbeitszeitregelung und zusätzliche Urlaubstage für Mütter weg, doch die Möglichkeit, Kinder tagsüber in Krippen oder ganztägig geöffneten Kindergärten unterzubringen, blieb.

Die Versorgung der 6- bis 10-Jährigen findet in Ostdeutschland, so das Deutsche Jugendinstitut 1998, zu sechzig Prozent in Horten statt, obwohl diese nicht mehr selbstverständlicher Teil ostdeutscher Schulen sind. In Westdeutschland ist ein nachmittägliches Betreuungsangebot für Schulkinder ebenso unüblich wie Ganztagsschulen. Dabei stellt sich die Frage, ob Mütter, die dann selbst für das Wohl der Kleinen sorgen, dies wegen der wenigen Betreuungsplätze tun oder aus ihrem Selbstverständnis heraus. Letzteres ist durch die Analysen der Jahrgänge 1961 bis 1970 wahrscheinlicher: Auf die Frage, ob ein Kleinkind leidet, wenn seine Mutter berufstätig ist, stimmten 65 Prozent der Befragten in Westdeutschland zu, während in Ostdeutschland nur 33 Prozent dieser Meinung waren.

Doch es gibt weitere Unterschiede: Die Geburt des ersten Kindes führt bei den meisten westdeutschen Paaren zur Heirat. Das dürfte nicht nur an finanziellen Anreizen wie dem Ehegattensplitting liegen, sondern vor allem an tradierten Wertvorstellungen. Die Grundeinstellung der ostdeutschen Frau indessen, nämlich trotz Kind berufstätig und unabhängig zu sein, bewirkt Gegensätzliches. Entgegen aller Prognosen hält der Trend zur Partnerschaft ohne Ehe weiter an und hat sich sogar auf die alten Bundesländer übertragen. Mittlerweile wachsen hier 17 Prozent aller Kinder nicht ehelich auf, in den neuen Bundesländern sind es über fünfzig Prozent. Wieso die Tendenz weiter steigt und selbst die Geburt des zweiten Kindes nur selten ein Nachholen bewirkt, bringt sogar Demografen in Erklärungsnöte.

Das zweite Kind ist in ostdeutschen Familien generell eher ungewöhnlich. Anders als beim ersten Kind scheint hier der Lebensentwurf nicht mehr bestimmend beziehungsweise mit dem Erstling größtenteils erfüllt zu sein. Soll die Familie nämlich vergrößert werden, wird das Augenmerk auch im Osten Deutschlands auf die finanzielle Voraussetzung gelenkt. Doch da diese vergleichsweise schlecht ist, so vermuten die Demografen am Max-Planck-Institut, liege die Wahrscheinlichkeit für eine ostdeutsche Frau, ein weiteres Kind zu bekommen, deutlich unter dem westdeutschen Niveau.

Bisher ist nicht abzusehen, wie und in welche Richtung sich die sozialen Strukturen einander angleichen werden. Das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung hat jedoch längst eine Bevölkerungsprognose parat: Der Osten wird seinen Aufholprozess fortsetzen, ihn aber selbst 2020 noch nicht abgeschlossen haben. ◁

Nardine Löser ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

INTERVIEW

Geburtenrate als demografisches Forschungsfeld

Michaela Kreyenfeld, promovierte Soziologin und Demografin am Max-Planck-Institut für demografische Forschung in Rostock, beschäftigt sich vorwiegend mit der Familienbildung in den neuen Bundesländern. Eine allgemeine Anpassung an die Strukturen in den alten Bundesländern schließt sie bisher aus.

Spektrum der Wissenschaft: Frau Kreyenfeld, warum ist die ehemalige DDR für die Demografie so interessant?

Michaela Kreyenfeld: Durch die Wiedervereinigung hat sich eine Art experimentelle Situation ergeben. Wir können erforschen, wie Menschen mit gesellschaftlichen Umbrüchen umgehen, wie schnell sie sich anpassen und wie stabil ihre persönlichen Einstellungen sind. Bis heute ist unter anderem das Geburten- und Heiratsverhalten in Ost und West unterschiedlich. Wir untersuchen nun, welche Mechanismen den Prozess der Anpassung steuern.

Spektrum: Können Sie schon sagen, wie lange diese Anpassung dauert?

Kreyenfeld: Nein. Die amtlichen Daten sind nicht detailliert genug, um Fertilitätsprognosen für Deutschland zu machen. Betrachtet man die zusammengefasste Fertilitätsziffer, sieht es zunächst so aus, als würde sich die Geburtenzahl pro Frau in Ost und West einander annähern. Diese Ziffer unterscheidet allerdings nicht zwischen dem ersten und dem zweiten Kind. Die Prozesse, die hinter der Angleichung stecken, sind sehr differenziert.

Spektrum: Findet die soziale Anpassung mehr in Richtung Ostdeutschland oder Westdeutschland statt?

Kreyenfeld: Was das Alter bei der Geburt des ersten Kindes betrifft, so lässt sich sagen, dass sich die Frauen in Ostdeutschland dem hohen westdeutschen Wert angenähert haben. Andere Aspekte wie das Heiratsverhalten, die Familienstrukturen oder das Erwerbsverhalten von Müttern muss man getrennt betrachten.

Spektrum: Gibt es Studien, die zeigen, welche Faktoren das Alter bei der Geburt des ersten Kindes bestimmen?

Kreyenfeld: Die Bildungsbeteiligung ist fast überall ein wichtiger Grund, die Elternschaft aufzuschieben. Weniger klar ist, welchen Einfluss Arbeitsmarktfaktoren auf die Familiengründung ausüben. So sind es oft gerade die Frauen mit schlechten Erwerbschancen, die sich für eine frühe Elternschaft entscheiden – und sich damit zumeist ihre Erwerbskarriere endgültig verbauen. In der DDR waren die Folgen allerdings nicht negativ für die Erwerbskarriere, da die familienpolitischen Rahmenbedingungen eine frühe Elternschaft förderten. Heute ist die hinausgeschobene Mutterschaft eine rationale Strategie, sich an die Bedingungen des Erwerbssystems anzupassen.

Spektrum: Könnte eine Annäherung nicht auch durch die gegenseitige Zuwanderung vonstatten gehen?

Kreyenfeld: Die Auswirkungen der starken Ost-West-Migration auf die Familienbildung sind noch nicht tiefgreifend genug analysiert worden. Ein ostdeutsches Paar, das in eine westdeutsche Stadt zieht, wird mit Rahmenbedingungen konfrontiert, in denen sich Kind und Beruf kaum vereinbaren lassen. Vermutlich wird das Paar versuchen, einen Platz in einer Kindertageseinrichtung zu finden. Oder aber die Frau wird nach der Geburt ihres Kindes temporär aus dem Arbeitsmarkt ausscheiden. Auch die gewollte Kinderlosigkeit könnte ein Resultat sein.

Spektrum: Ist denn die Kinderlosigkeit nach der Wende angestiegen?

Kreyenfeld: Das lässt sich nicht abschließend sagen, denn die relevanten Geburtsjahrgänge haben das Ende ihrer fruchtbaren Phase noch nicht erreicht. Aber für die nach 1970 Geborenen zeigt sich bislang, dass in den alten Bundesländern mehr Menschen ohne Nachwuchs bleiben als in den neuen Bundesländern. Es bleibt abzuwarten, ob der Anteil kinderloser Frauen auch im Osten Deutschlands ansteigt. ◁

Das Interview führte **Nardine Löser**.

JUGENDLITERATUR

Bas Haring

Warum ist der Eisbär weiß?

Bas Haring erklärt die Evolution und die Geschichte des Lebens

Aus dem Niederländischen von Monika Götze.
Campus, Frankfurt am Main 2003. 158 Seiten, € 18,90

Der niederländische Originaltitel »Käse und die Evolutionstheorie« trifft die Sache besser als der deutsche. Denn was Bas Haring da anhäuft, ist ein Berg von kleinen Käseecken, die Appetit machen auf mehr.

Bas Haring, Jahrgang 1968, studierte in Utrecht Informationstechnologie, promovierte über Künstliche Intelligenz und arbeitet an der Universität Leiden. Gleich zweimal wurde der vorliegende Titel – Harings Debut – in den Niederlanden ausgezeichnet: mit der »Goldenen Eule« für Jugendliteratur und dem »Eureka!-Preis« für Sachbücher.

Das Buch beginnt ganz harmlos. Im ersten Teil, bescheiden »Die Evolutionstheorie« genannt, erklärt Haring in einer Sprache, die auch Neunjährige verstehen, »wie es kommt, dass es überall verschiedene Tier- und Pflanzenarten gibt, und was Gene sind«. Fantasievoll hangelt er sich dazu von Beispiel zu Beispiel. Die verwandten Sportarten Rugby und American Football müssen herhalten, um das Prinzip der Artentstehung zu verdeutlichen. Fachlich korrekt orientiert er sich an den neueren wissenschaftlichen Theorien, ohne dabei einen Absolutheitsanspruch zu stellen: »Mein Buch soll nicht als tiefgründige und wissenschaftliche Abhandlung begriffen werden. Vieles habe ich vermutlich vergessen aufzuschreiben, und vielleicht liege ich ab und zu sogar ganz falsch.«

Im zweiten Teil »Die Evolutionstheorie und weiter …« beschäftigt sich Haring mit spannenden philosophischen Fragen, die jeden interessieren. Ist Homosexualität natürlich? Existieren Gut und Böse? Warum sterben wir? Haring ist von Vergleichen nahezu besessen. Dazu bedient er sich der wirklich wichtigen Dinge des Lebens: Neben Käse sind das zum Beispiel Fußballmannschaften, Feuerwehrautos, Flugzeuge und die Evolution von Microsoft Windows.

Diese Unverkrampftheit ist es, die für Entspannung und Unterhaltsamkeit bis zur letzten Seite sorgt. Der Untertitel des Buches geht allerdings am Inhalt vorbei. Vielmehr reißt der Autor bedeutsame Themen an, die zum Nach- und Weiterdenken inspirieren, ohne zwanghaft einer pädagogischen oder chronologischen Linie zu folgen.

Nebenbei stürzen schon einmal Weltbilder vom Sockel, egal ob es ums Kinderkriegen oder den Wert der Moral geht. Wenn der Leser schließlich im letzten Kapitel und Haring bei Gott angekommen ist, braucht der Autor gar nicht mehr viel zu argumentieren, um dem Leser zu zeigen: Mit oder ohne Gott, das Leben, der Zufall und die Menschheit sind unheimlich bunt und spannend. Nach Haring übrigens eher ohne oder nur mit einem »Mini-Gott«.

Manchmal schreibt Haring mehr für die erwachsenen Kinder: »Wen wundert es, dass es in der Natur nur so wimmelt von lüsternen Tieren? Und dass der Papst die Empfängnisverhütung verbieten möchte? Schließlich möchte er, dass die Gläubigen möglichst viele katholische Kinder in die Welt setzen!«

»Warum ist der Eisbär weiß?« ist ein Aufklärungsbuch über die Evolution, das Leben und den Rest. Eltern, die ihren Kindern raue Wahrheiten ersparen wollen, sollten die Finger davon lassen. Denn die Wirklichkeit ist manchmal bitter: »Wir sind alle nur Kopierer und Sklaven unserer Gene.« Haring versteht es jedoch, Bitteres mit viel Humor zu vermitteln, sodass es nicht weh tut. Natürlich können aufgeschlossene Kinder das Buch auch allein lesen. Aber wie bei allen Aufklärungsbüchern wäre es am schönsten, wenn sie zusammen gelesen – und besprochen würden.

Antje Kahlheber

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Mainz.

»Ein Hund mit Federn ist vielleicht eine super Idee, aber ich glaube nicht, dass es ihn jemals geben wird … Ein Hund kann mit einem Huhn keine Kinder bekommen, weil die Gene eines Hundes von denen eines Huhns zu unterschiedlich sind: Wenn man beide mixt, bekommt man Unsinn.«

FREMDE LÄNDER

Gianni Guadalupi und Giorgio Mesturini

Korallen und Wüsten

Schönheiten des Roten Meeres

Aus dem Italienischen von C. T. M., Mailand.
Jahr-Top-Special-Verlag, Hamburg 2002. 240 Seiten, € 49,80

Wer seinen Urlaub am Roten Meer verbringt, will dort in der Regel tauchen oder schnorcheln. Der vorliegende Bildband klärt uns darüber auf, dass die Gegend auch über dem Meeresspiegel Spektakuläres zu bieten hat – und zwar, dem Titel zum Trotz, nicht in erster Linie Wüsten.

Der erste, historische Teil des Buches beginnt mit der Expedition in das legendäre Land Punt unter dem weiblichen Pharao Hatschepsut, erzählt von Phöniziern, Römern und den modernen Europäern, ihren Handelsrouten und Kriegen. Wir sehen im Zeitraffer die Historie ablaufen, auf Wandmalereien, Münzen, Illustrationen alter Handschriften und Portulanen, den alten Seekarten, auf denen lange Zeit das Rote Meer tatsächlich rot eingezeichnet war. Das Kapitel endet mit der Rückgabe des Sinai an Ägypten 1973.

Der zweite Teil ist eine Schiffsreise entlang den Küsten der Anrainerländer, von der Ostküste Ägyptens, an deren Südzipfel man noch die letzten Dugongs – exotische Meeressäuger – beobachten kann, in sudanesische Gewässer zum haifischreichen Riff Angarosh, wo Jacques

Yves Cousteau 1951 die erste seiner Expeditionen startete, vorbei an der verlassenen Inselstadt Suakin, der Insel Dahlak mit ihren Mangrovenhainen und der Küste Eritreas, dann zurück über das Bab el Mandab (die Meerenge zum Indischen Ozean), vorbei an Mokha, der jemenitischen Stadt, die dem Mokka seinen Namen gab, bis in den östlichen Zipfel des Roten Meeres, den Golf von Akaba. Die ganze Reise ist mit herrlichen Fotos untermalt – es wird nicht langweilig.

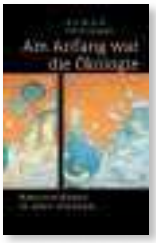
Dann endlich beschäftigt sich der dritte Teil mit der Unterwasserwelt des Roten Meeres, in absolut brillanten Aufnahmen, die auch den Wasserscheuen begeistern. Das letzte Kapitel bebildert das, wonach der fortgeschrittene Taucher sich sehnt: Schiffswracks!

Das Buch ist weder ein Tauchführer noch ein Reiseführer im üblichen Sinn, auch wenn Gianni Guadalupi hauptsächlich Reiseberichte verfasst und herausgibt und Giorgio Mesturini ein renommierter Unterwasserfotograf ist. Luft- und Unterwasseraufnahmen ergänzen sich zu einem Pracht-Bildband, bei dem sofort die klaren, satten Farben ins Auge springen. Wer andere Bildbände vom italienischen Verlag White Star kennt, der das Original herausgebracht hat, der weiß, wovon ich schwärme.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei Spektrum der Wissenschaft.

Zwischen den Ästen der Schwammkorallen verstecken sich Unmengen kleiner Fische.



ÖKOLOGIE

A. P. und A. H. Hüttermann

Am Anfang war die Ökologie

Naturverständnis im Alten Testament

Antje Kunstmann, München 2002. 189 Seiten, € 16,90

Wenn man die Gesetze der Juden im antiken Palästina, die in der Bibel enthalten sind, auf ihren biologischen Gehalt hin untersucht, so wird man zu erstaunlichen Ergebnissen kommen.«

Dieses Versprechen aus der Einleitung wird in der Tat eingelöst. Aloys P. Hüttermann, Direktor des Instituts für Forstbotanik der Universität Göttingen und Ehrenmitglied der Hebräischen Universität von Jerusalem, und sein Sohn Aloys H. Hüttermann, promovierter Chemiker, wagen sich mit ihrem Buch auf ein Terrain, das sowohl jüdische als auch christliche Theologen schon seit langem beschäftigt. So gehören zum überlieferten Bestand des jüdischen Glaubens überaus komplizierte Speisevorschriften; die Autoren fragen, ob diese Regeln nach dem heutigen biologischen Kenntnisstand einen Sinn ergeben.

Eigentlich hat die Bibel in Bezug auf ihre ökologischen Aussagen einen schlechten Ruf. Das bekannte Zitat »Macht euch die Erde untertan« ist jahrhundertelang als göttlicher Freibrief für eine rücksichtslose Ausbeutung der Natur verstanden worden. Ein Missverständnis, sagen Vater und Sohn Hüttermann, das auf einem Übersetzungsfehler beruht. Dem Menschen wird durch Gott zwar eine herrschende Position über die Natur zugedacht, aber nur so lange, wie er sich ihrer als würdig erweist und die Natur mit dem ihr gebührenden Respekt behandelt.

Die landschaftlichen und klimatischen Verhältnisse, mit denen die Juden zu Zeiten des Alten Testaments konfrontiert waren, entsprachen in etwa denen der heutigen Mittelmeerregion: Es gab nur sehr wenig Niederschläge, die unregelmäßig über das Jahr verteilt fielen. Andere Kulturen mit ähnlich hohen Besiedlungsdichten haben es nachweislich nicht geschafft, unter vergleichbaren Bedingungen zu leben, ohne dass es zu massiven Hungersnöten und Einbrüchen in der Bevölkerungszahl kam. Dies ist bei den Juden nie vorgekommen. ▷

Die Autoren sehen den Grund dafür in der Einhaltung strenger religiöser Vorschriften, die eigentlich ökologisch begründet waren. So hatten die auf dem Lande lebenden und arbeitenden Juden alle sieben Jahre ein Sabbatjahr einzulegen. In diesem Zeitraum war es ihnen untersagt, die Felder und Weinberge abzuernten; sie lebten von ihren bis dahin erwirtschafteten Vorräten. Durch diese Pause hatten die bewirtschafteten Böden Zeit zur Regeneration, wodurch der Humusschicht ihre Fruchtbarkeit erhalten blieb.

Die in der Bibel aufgeführten Regeln wurden jedoch nicht blind befolgt, sondern in Krisenzeiten weiterentwickelt. Im Jüdischen Krieg (67–70 n. Chr.) verwüsteten die Römer das Land, weshalb die Juden in die für Ackerbau ungeeigneten Hügelgebiete ausweichen mussten. Unter diesen Bedingungen wäre das profitabelste Auskommen durch Schaf- und Ziegenhaltung zu finden gewesen. Genau das verboten jedoch die Rabbiner, und die Juden hielten sich daran. In irgendeinem Sinne muss ihnen klar gewesen sein, dass sie durch die Kleinviehhaltung ihre ohnehin schon kargen Lebensräume weiter verwüstet hätten. Dieses Wissen ist durch moderne Forschungen inzwischen bestätigt worden, aber noch längst nicht Allgemeingut. Die Ausbreitung von Wüsten ist ein globales Problem von solcher Bedeutung, dass die Uno eigens zu ihrer Bekämpfung eine Konvention *(United Nations Convention to Combat Desertification)* verabschiedet und mehrere Kommissionen gebildet hat. Deren Berichte benennen die Kleintierhaltung als eine der Hauptursachen.

Mit ihrem Naturverständnis waren die Juden den zu dieser Zeit blühenden Hochkulturen der Ägypter, Griechen, Römer und Babylonier weit voraus. Für diese Diskrepanz liefern die Autoren eine plausible Begründung: Ägypter und Babylonier siedelten in sehr fruchtbaren Landstrichen, in denen ein schonender Umgang mit der Natur nicht so dringend geboten war. Den Römern und Griechen war die Schädlichkeit ihres Verhaltens durchaus bewusst, sie zogen jedoch keine Konsequenzen daraus.

Die Juden dagegen konnten in ihrer unwirtlichen Umgebung nur überleben, indem sie ein profundes biologisches Wissen erwarben und daraus strenge Regeln herleiteten. Ökologische Vergehen hatten für sie denselben Stellenwert wie moralische. Da die Natur von Gott erschaffen war, sahen sie biologische Forschungen und gezielte Experimente nicht als Zeitverschwendung oder gar Sünde an, sondern als eine Form von Gottesdienst. Auf Grund des schon damals sehr hohen Alphabetisierungsgrades konnte das so angesammelte Wissen in schriftlicher Form, eben in der Bibel, für die Nachwelt erhalten werden.

Für die Juden waren biologische Forschungen und Experimente weder Zeitverschwendung noch Sünde, sondern eine Form von Gottesdienst

Warum ging aber dieser enorme Wissensschatz verloren? Nach der Eroberung Palästinas durch die Römer veränderten sich die Besitzverhältnisse vom Kleinbauerntum hin zu Großgrundbesitz. Dadurch wuchs der Anteil der in Städten lebenden Juden immer weiter an. Vom 7. bis zum 19. Jahrhundert gab es überhaupt keine jüdischen Bauern mehr. Dadurch wurden viele der in der Bibel aufgeführten Regeln gegenstandslos, oder für ihre Einhaltung gab es keinen Grund mehr. Deswegen wurden seit dem Mittelalter einige der Vorschriften zunehmend nicht mehr beachtet. Und mit der Zeit ging das Wissen um ihre Bedeutung verloren.

Die Beweise und Schlussfolgerungen der Autoren sind bis auf einige wenige Ausnahmen ohne weiteres nachvollziehbar und plausibel; biologische Fachbegriffe werden dem nicht vorgebildeten Leser verständlich erläutert. Störend wirkt nur das stellenweise etwas gewaltsame Bemühen um eine moderne Sprache: »Es kommt zum Showdown«, »ein Ranking der Wasserqualität«, nach Alexanders des Großen Tod geriet »auch Palästina in die Konkursmasse seines riesigen Reiches«.

Wer unvoreingenommen und aufgeschlossen an dieses Buch herangeht, wird Verblüffendes über das herausragende biologische Wissen der antiken Juden erfahren.

Anke Sonnenberg

Die Rezensentin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Konstanz.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

Gerhard Henschel
Die wirrsten Grafiken der Welt
Hoffmann & Campe, Hamburg 2003,
208 Seiten, € 22,90

Ein Bild kann mehr sagen als tausend Worte. Kein Wunder also, dass man komplexe Strukturen und komplizierte Prozesse grafisch so aufbereiten möchte, dass sie ohne viele Worte für sich selbst sprechen können. Dies gelingt beileibe nicht in allen Fällen, was schon der erste Blick in »Die wirrsten Grafiken der Welt« bestätigt.

Diese besonders »gelungenen« visuellen Umsetzungen hat Gerhard Henschel zunächst für die *taz* gesammelt und jetzt zum Buch zusammengestellt. Es ist nicht nur als amüsante Freizeitlektüre für Menschen geeignet, die ständig Bücher mit interessanten Grafiken lesen müssen, sondern auch, um zu zeigen, wie es nicht sein sollte.

Aus der Rezension von Daniel Dreesmann

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■■■
Suchen/Finden	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	24

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

PSYCHIATRIE

Gerald Hüther und Helmut Bonney

Neues vom Zappelphilipp

ADS: verstehen, vorbeugen und behandeln

Walter, Düsseldorf 2002. 154 Seiten, € 14,90

Dieses Buch wartet zunächst mit beeindruckenden Zahlen und Fakten auf: Lag 1990 die Zahl der Kinder, die wegen des »Aufmerksamkeitsdefizitsyndroms« (ADS) in den USA ärztlich behandelt wurden, noch unter einer Million, so sind es heute schon über 10 Millionen. In Deutschland sind schätzungsweise 170 000 bis 350 000 schulpflichtige Kinder betroffen; davon werden heute etwa 50 000 mit Ritalin und anderen Medikamenten behandelt. Bei diesen Mitteln, die noch 1990 in Deutschland gerade mal in 1500 Fällen verordnet wurden, handelt es sich um Amphetamine, welche die Dopaminregulation im Gehirn normalisieren und damit Verhaltensauffälligkeiten entgegenwirken sollen.

Gerald Hüther, Hirnforscher aus Göttingen, und Helmut Bonney, Kinderpsychiater und Familientherapeut aus Heidelberg, haben ein leidenschaftliches Plädoyer gegen diese Anpassung auf Rezept geschrieben. Zur Begründung führen sie zweierlei an. Erstens: Erst seit bestimmte Verhaltensweisen von Kindern – überschießende Impulsivität, motorische Unruhe, mangelnde Aufmerksamkeit – als so sehr normabweichend angesehen wurden, dass man sie als Krankheit namens ADS einstufte, wurden sie auch diagnostiziert und medikamentös behandelt. Das ist seit Mitte der 1980er Jahre der Fall. Zweitens: Neue Erkenntnisse der Hirnforschung lassen die »Dopaminmangelhypothese«, auf der die Therapie mit Psychopharmaka beruht (Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 30), als äußerst fragwürdig erscheinen.

Zahlreiche Lehrer haben Ritalin als wahren Segen erlebt

Hüther und Bonney legen nun eine Erklärung für ADS vor, die das Kind in seiner Entwicklung und in seinen Umweltbezügen in den Mittelpunkt rückt. Damit reihen sie sich ein in die immer größer werdende Schar derjenigen, die einer pharmakologischen Therapie des ADS kritisch gegenüberstehen, und sprechen gewiss vielen ebenfalls kritischen Eltern aus der Seele. Sie müssen allerdings mit Widerspruch vor allem derer rechnen, die Ritalin und ähnliche Präparate in den letzten Jahren als wahren Segen erlebt haben. Ich kenne zahlreiche Lehrer, in deren Klassen vormals unkonzentrierte Zappelphilippe sich endlich ihren Aufgaben widmen können.

Die Autoren erklären in gut verständlicher Sprache, wie sich das kindliche Gehirn in Wechselwirkung zwischen biologischer Grundausstattung und Außenreizen formt und wie das Kind seine persönlichen Verhaltensmuster erwirbt. Ein besonderes Anliegen ist ihnen die Bedeutung der frühen Bindungserfahrungen zwischen Eltern und Kind. Sind die Bindungen stabil, geben sie dem Kind emotionale Sicherheit, was die Benutzung des Gehirns beeinflusst.

Was hat das mit dem Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom zu tun?

Hüther und Bonney argumentieren folgendermaßen: Es gibt Kinder, die schon von Geburt an unruhiger sind als andere, die häufiger schreien, wacher, aufgeweckter, leichter stimulierbar, insgesamt »empfindlicher« sind. Bei diesen Kindern ist dementsprechend schon von Beginn an das dopaminerge System aktiver. Dessen zentrales Merkmal ist die Ausschüttung des Botenstoffs Dopamin, die immer dann stattfindet, wenn Unerwartetes, Neuartiges, Aufregendes wahrgenommen wird. Bei Kindern mit besonders aktivem dopaminergem System entwickelt sich nun rasch eine Hirnstruktur, die besonders leicht durch alle möglichen Reize stimulierbar ist. Diese innere Unruhe ist von den Kindern selbst nicht kontrollierbar. Ihre Zappeligkeit macht sie wiederum zu »schwierigen« Zeitgenossen, lässt sie in psychosoziale Konflikte geraten, sodass selbst die Eltern unsicher werden und es schwer haben, dem Kind eine sichere Bindung zu bieten.

Hüther und Bonney bemerken sehr wohl, dass ihr Erklärungsmodell im Widerspruch steht zu den Erfolgen der Therapie des ADS mit Psychopharmaka. Deren Wirkung beruht ja gerade darauf, dass die Dopaminausschüttung im Gehirn der Kinder angeregt wird. Doch dieser Widerspruch, so die Autoren, sei bloß ein scheinbarer. Die durch die Medikamente ausgelöste, plötzliche und massive Freisetzung von Dopamin führe zu einer schnellen Entleerung der Dopaminspeicher, die dann nur langsam und allmählich mit neu gebildetem Dopamin aufgefüllt würden. In dieser Zeit, zirka vier bis sechs Stunden, ist die Dopaminfreisetzung nicht mehr so gut durch neue Reize stimulierbar. Dies ist die Zeit, in der die Kinder ruhiger werden und sich konzentrieren können – so lange, bis der alte Zustand wieder erreicht ist. Lehrer, die unter Behandlung stehende Schüler in ihren Klassen haben, wissen davon ein Lied zu singen, denn die Wirkung hält oft schon nicht mehr bis zur sechsten Unterrichtsstunde an.

Frühe therapeutische Maßnahmen sollen der Verfestigung von ADS zuvorkommen

Welche Alternativen schlagen die Verfasser nun vor? Hüther und Bonney setzen beim Verhalten der Kinder und bei der Arbeit mit dem Umfeld an. Sie fordern den frühen Beginn therapeutischer Maßnahmen, damit die für das ADS charakteristische Nutzung des Gehirns sich gar nicht erst verfestigt. In einer Reihe von Fallbeispielen wird gezeigt, wie durch klare Zielvereinbarungen die Eltern zur Mitarbeit gewonnen werden können und wie durch spezifische, motivierende Hilfestellungen (zum Beispiel kunsttherapeutische Gestaltung, Arbeit mit Lern-Software) die Kinder zur Ruhe gebracht werden.

So nachvollziehbar das Plädoyer der Autoren für ein komplexes Vorgehen auch ist: Der Anspruch, Kinder mit ADS und ihre Familien nunmehr in erster Linie durchgängig familientherapeutisch zu behandeln, dürfte im Alltag kaum umsetzbar sein. Dennoch: Für mich ist die neurobiologische Argumentation des Buches sehr schlüssig und überzeugend. Es liefert viel Stoff für eine kritische Diskussion des Themas und sollte von Kinderärzten, Lehrern, Therapeuten und engagierten Eltern unbedingt beachtet werden.

Reiner Bahr

Der Rezensent ist promovierter Sprachheilpädagoge und Fachleiter am Studienseminar für Sonderpädagogik in Duisburg.

HIRNFORSCHUNG

Barbara Strauch

Warum sie so seltsam sind

Gehirnentwicklung bei Teenagern

Aus dem Amerikanischen von Sebastian Vogel.
Berlin Verlag, Berlin 2003. 336 Seiten, € 19,90

Die Nachricht des Buches ist durchaus neu und interessant. Die hergebrachte Lehrmeinung, der physiologische Teil der Gehirnentwicklung sei nach den ersten drei Lebensjahren abgeschlossen, gerät ins Wanken. Im Gehirn von 13- bis 18-Jährigen herrscht jugendlicher Überschwang – im Wortsinn. Neue Nervenzellen werden in so großer Menge produziert, dass mit den neuen bildgebenden Verfahren an einzelnen Stellen des Gehirns eine beträchtliche Volumenzunahme sichtbar wird. Aber das ist erst die Vorbereitung. Der eigentliche Reifungsprozess findet statt, indem von den vielen Nervenzellen nur die »richtig verschalteten« übrig bleiben und alle anderen zu Grunde gehen. In der Zwischenzeit ist das entsprechende Gehirnareal eine große Baustelle. Kein Wunder, dass Teenager so seltsam sind.

Die Befunde sind neu, weil die bildgebenden Verfahren neu sind. Die klassische Alternative, das Sezieren von Gehirnen, brachte kaum Aufschlüsse, weil in dieser Altersgruppe wenig Leute sterben, sodass nicht genug aussagekräftiges Material zur Verfügung steht. Die Ergebnisse passen auch einigermaßen zu den Aktivitäten des Gehirns, die man von außen beobachten kann. So findet die für die Reifung charakteristische Auslese von Nervenzellen im Stirnlappen, der als für moralische Urteile zuständig gilt, just um die Zeit statt, in der die moralische Einstellung des Jugendlichen sich zu festigen pflegt.

Die amerikanische Wissenschaftsjournalistin Barbara Strauch ist durch das ganze Land gereist und hat die Entdecker dieser Neuigkeiten, allen voran den Hirnforscher Jay Giedd aus Washington, ausgiebig ausgefragt. Eigentlich hätte sie eine spannende Geschichte zu erzählen.

Aber es gibt ja angeblich die amerikanische Journalistenregel, man solle den Leuten möglichst alles dreimal sagen. Strauch verwässert ihren eigentlich schmackhaften Brei, indem sie diese Regel bis zum Exzess befolgt. Wörtliche Zitate klingen über weite Strecken, als hätte Strauch die Worte so niedergeschrieben, wie sie spontan und unsortiert dem Munde der großen Geister entströmten.

Außerdem versucht sie mit einiger Gewalt den Leser glauben zu machen, mit Hilfe der wissenschaftlichen Ergebnisse könne er mit seinen pubertierenden Kindern besser zu Rande kommen. Schon recht, dann ist eben nicht der Überschuss an Geschlechtshormonen, sondern der im Umbau befindliche Stirnlappen Ursache eines Verhaltens, das den Eltern auf die Nerven geht oder ihnen schlaflose Nächte bereitet. Aber hilft dieser wissenschaftliche Erkenntnisgewinn gegen schlaflose Nächte? Eben nicht, denn direkt eingreifen kann – und sollte – man ins Gehirn ebenso wenig wie in den Hormonhaushalt.

Schließlich erweist die Autorin ihrem erklärten Ziel – Verständnis für die wilden Jugendlichen – einen Bärendienst, indem sie die Helden ihres Buches bei jeder Gelegenheit als exotische Monster hinstellt. Mit starken Worten versucht sie jene Mischung aus Bewunderung und Abscheu zu erwecken, die eher zu Berichten über den sibirischen Tiger oder – na ja – den weißen Hai passt. Was für ein Unfug. Wenn ich meine Kinder besser verstehen will, sollte ich nicht nach dem Verrückten in ihnen suchen – das es zweifellos gibt –, sondern nach dem Vertrauten.

Und das findet man in dem Buch mühelos, wenn auch unter dem Etikett »verrückt«. Bis zum Mittag im Bett bleiben; von mehreren Aufträgen alle bis auf höchstens einen vergessen; von einem Moment auf den anderen die Stimmung wechseln; den nächsten greifbaren Menschen als Ursache allen Übels beschimpfen; trinken oder kiffen bis zum Vollrausch; nicht zu vergessen den Überschwang der Hormone – das sollte man sich ja alles abgewöhnen, wenn man erwachsen wird. Aber Hand aufs Herz, ihr Erwachsenen: Tut doch nicht so, als sei euch das vollkommen zuwider.

Bis zum Mittag im Bett zu bleiben ist vielleicht pubertär, aber nicht verrückt

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. ◁

PREISRÄTSEL

Wandern auf Zielos

Von Pierre Tougne

Paul möchte das verfallene Logikerkloster von Zielos besuchen. Bei seiner Wanderung kommt er an eine unbeschilderte Weggabelung, an der drei ortskundige Hirten ihre Schafe hüten. Von seinem zuverlässigen Gastwirt weiß er, dass ein Weg zum Kloster, der andere aber zu einer schäbigen Herberge führt, deren geldgieriger Wirt erschöpfte Wanderer mit überteuerten Zimmern schröpft. Außerdem weiß er, dass von den drei Hirten einer stets die Wahrheit sagt, einer stets lügt und der dritte je nach Lust und Laune die Wahrheit sagt oder lügt.

Wie viele Fragen muss Paul mindestens stellen, und welche sind das, um mit Sicherheit den richtigen Weg zu finden?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei Brettspiele »Tribalance«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 16. Dezember 2003, eingehen.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

WEBSEITEN FÜR KINDER

Kinder-Net

Internetseiten, die gezielt für die junge Kundschaft konzipiert sind, stillen deren enormen Wissensdurst und machen spielerisch Appetit auf mehr Wissenschaft.

Von Katrin Schaller

Mama, woraus ist Gummi?« Schon die Fragen der Vierjährigen fordern das Allgemeinwissen der Eltern heraus. Und die Älteren wollen die Antwort noch genauer wissen. Die finden sie bei Bedarf oftmals auch im Internet – auf speziellen Kinderseiten zu wissenschaftlichen Fragestellungen.

Ein Glanzstück unter ihnen ist die Kinder-Homepage des Deutschen Museums in München (http://www.deutsches-museum.de/bildung/akademie/navi.htm): Hier können sich Sechs- bis Zwölfjährige auf eine Zeitreise vom Urmenschen bis zum Astronauten begeben. Auf der sehr ansprechend und übersichtlich gestalteten Seite lernen sie en passant, wie die Menschen in der Steinzeit lebten, was die Erfindung des Rads bewirkte, wie sich die Schifffahrt entwickelte und warum Flugzeuge fliegen. Manche der Texte sind auch zum Anhören. Animierte Bilder beleben die Seiten, und kurze Filmsequenzen erklären kompliziertere Sachverhalte wie eine Dampfmaschine. Spielereien wie eine Fahrt mit einem Mondauto sowie ein Wissensquiz runden das gelungene Angebot ab. Einziges Manko der Seite: Sie bietet nicht jede Woche etwas Neues.

»Heckers Hexenküche« bietet dieses Mal Experimente mit Flaschen.

Das ist anders bei der Internet-Präsenz von Lilipuz, dem Wissenschaftsradio für Kinder vom WDR 5 (http://www.wdr5.de/lilipuz/wissenschaft/hexenkueche/wissenschaft.phtml). Das »Radiomikroskop« erklärt in kindgerecht aufbereiteten Radiobeiträgen Themen aus allen Bereichen der Wissenschaft von Aberglaube bis Weltraum. Wer das Praktische liebt, darf in »Heckers Hexenküche« experimentieren. Dort hält Hexenmeister Hecker Rezepte für einfache Versuche zum Selbstmachen bereit; so können die Kinder aus einer Scheibe Spreewaldgurke eine Batterie bauen oder andere verblüffende Tricks erlernen.

Ohne Filme und Audiobeiträge, aber trotzdem informativ sind TK Logo von der Techniker Krankenkasse und GEOlino. TK Logo (http://www.tk-logo.de/) bietet mehr als nur Medizin und Gesundheit – auch Astronomie, Geowissenschaften, Chemie und Physik haben hier ihren Platz in ständig aktualisierten, relativ kurz gehaltenen und bebilderten Texten. Ein Wissensquiz, Spiele, Buch- und Freizeittipps machen die eher nüchtern gestaltete Seite zu einem gelungenen Angebot.

GEOlino, das Kind der Zeitschrift GEO, (http://www.geo.de/GEOlino/) kommt etwas wilder und unübersichtlicher daher als die anderen Wissenschaftsseiten für die junge Generation. Leider schafft es die Redaktion nicht – anders als die bisher genannten Seiten –, auf Werbung zu verzichten. Die flott geschriebenen Texte sind zum Teil recht lang, manchmal aber auch in bester GEO-Manier mit wunderschönen Fotostrecken oder Animationen aufgepeppt. Natürlich fehlen auch hier weder ein Wissensquiz noch die Bastel- und Experimentierangebote – vom Kleber zum Selbstanrühren bis zum Ballon Marke Eigenbau ist einiges geboten.

Alle Seiten bieten reichlich Information aus Wissenschaft und Technik, doch gezielte Fragen (wie auch die nach der Zusammensetzung von Gummi) können sie nur bedingt beantworten. Alle – außer der des Deutschen Museums – verfügen über eine Suchoption im eigenen Archiv. Dort wird man allerdings nur fündig, wenn das gesuchte Thema nicht nur irgendwo erwähnt wird, sondern einen eigenen Beitrag hat.

Die Autorin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Die stabilisierende Wirkung der Stichsäge

Kann ein Pendel im Gleichgewicht auf dem Kopf stehen? Ja, vorausgesetzt, die »Schwerkraft« weist nach oben – auch wenn das nur für sehr kurze Zeitabschnitte der Fall ist.

CHRISTOPH PÖPPE

Die Stichsäge stemmt die Klobürste. Durch rasche Auf- und Abbewegung des Aufhängepunktes richtet sich das »Pendel« auf – zitternd und um die Vertikale schwankend, aber immerhin.

Von Christoph Pöppe

Einen Besen auf der flachen Hand zu balancieren – mit den Borsten nach oben, wohlgemerkt – ist nicht übermäßig schwer. Es ist sogar eine beliebte Übungsaufgabe in der Robotik geworden, ein kleines Wägelchen so anzusteuern, dass es durch Hin- und Herfahren einen auf seiner Oberfläche beweglich befestigten Besen in der kippeligen vertikalen Position hält.

Die Kunst besteht darin, genau zu beobachten oder zu erspüren, in welche Richtung das gute Stück abzukippen droht, und dieses Abkippen rechtzeitig durch eine wohl dosierte horizontale Gegenbewegung zu vereiteln – nicht zu heftig, denn sonst droht die Katastrophe in der Gegenrichtung. Es gilt also, ein eigentlich instabiles System durch geeignetes Reagieren zu stabilisieren.

Überraschenderweise kann man selbst auf diese Rückkopplung und damit auf die bescheidene Intelligenz, die in die Steuerung eines Roboterwägelchens eingebaut ist, verzichten. Es genügt, den Aufhängepunkt hinreichend schnell auf und ab zu bewegen. Wie von Geisterhand richtet sich der Besen auf und bleibt aufrecht stehen, allenfalls gemächlich ein wenig um die Vertikale schwingend.

Es muss auch nicht unbedingt ein Besen sein. Die Theoretiker reden lieber vom »umgekehrten starren Pendel«: An einer Aufhängung ist eine masselose starre Stange befestigt, und an deren anderem Ende sitzt ein Massenpunkt. Die Realisierungen können von dieser Idealvorstellung weit entfernt sein.

Als Antrieb bietet sich für große Hörsaalvorführungen eine Stichsäge an. Etwas weniger großräumig und geräuschvoll geht es mit einem elektrischen Rasierapparat zu; und wer die Sache genau untersuchen und quantitativ studieren möchte, bevorzugt die Membran eines großen Lautsprechers. Denn deren Schwingungsfrequenz lässt sich durch Anschluss an einen Tongenerator präzise und nach Wunsch einstellen. Entsprechend winzig ist das Pendel, das der Experimentator auf die Membran klebt.

Wie kommt das Phänomen zu Stande? Am Anfang muss man dem Massenpunkt schon ein bisschen aufhelfen, indem man ihn über die horizontale Lage hinaushebt. Ein abwärts hängendes Pendel ist auch durch heftiges Auf-und-ab-Schütteln nicht aus der Ruhelage zu bringen. Nehmen wir also an, dass das Pendel in einer Stellung schräg nach oben losgelassen wird. In diesem Moment ereilt seinen Aufhängepunkt der Ruck nach unten. Von dem bekommt der Massenpunkt am Pendelende nur die Komponente in Richtung der Stange mit, mit dem Effekt, dass es ihn nicht nur nach unten treibt, sondern auch einwärts, das heißt auf die vertikale Achse zu, die durch den Aufhängepunkt geht. Die Abwärtsbewegung des Aufhängepunktes stellt also das Pendel steiler.

Das könnte der Effekt sein, der das Pendel in die Vertikale bringt und dort stabilisiert: Wenn der Aufhängepunkt schneller abwärts bewegt wird, als der Massenpunkt auf Grund seines Eigengewichts ohnehin fällt, dann fahren sie beide beschleunigt zur Hölle, und zwar genau vertikal übereinander. Aber in der Realität geht es nach kurzem Absinken schon wieder aufwärts, und dasselbe Spiel wiederholt sich mit umgekehrtem Vorzeichen: Vermittelt durch die starre Stange, wird der Massenpunkt nicht nur nach oben, sondern auch nach außen gedrückt, die Stange steht also hinterher flacher als zuvor. Über eine ganze Schwingungsperiode gemittelt muss also das Auf-und-ab-Hüpfen des Aufhängepunktes den Effekt null haben. Oder?

Nicht ganz. Die durch die Stange ausgeübte Kraft zerlegt sich in eine vertikale und eine horizontale Komponente. Je steiler das Pendel steht, desto geringer ist die horizontale Komponente. Der Ruck nach oben wirkt auf ein steileres Pendel und treibt es deswegen weniger weit auswärts, als der Ruck nach unten es einwärts getrieben hat. Netto kommt ein einwärts treibender Effekt zu Stande, der sogar das Eigengewicht der Pendelmasse übertreffen kann.

Doch halt! Die Bewegung des Aufhängepunktes besteht nicht nur aus zwei Rucken. Lassen wir es dahingestellt sein, wie Stichsäge und Rasierapparat im Einzelnen konstruiert sind und welche Mu-

Die aufrichtende Wirkung der Trägheitskraft

Der Aufhängepunkt $z(t)$ des Pendels vollführt die Sinusschwingung $z(t) = a \sin \omega t$ (a Amplitude der Schwingung, ω Kreisfrequenz). Daraus ergibt sich die Beschleunigung $\ddot{z}(t) = -\omega^2 a \sin \omega t$. Im mit dem Aufhängepunkt mitbewegten Bezugssystem wirkt daher auf die Pendelmasse m außer ihrem Gewicht mg die Trägheitskraft $F_{\mathrm{Tr}} = m\omega^2 a \sin \omega t$. Diese ist nach oben gerichtet, solange sich der Aufhängepunkt in der oberen Hälfte seiner Bahn befindet ($\sin \omega t > 0$). In diesem Teil der Bahn »fühlt der Massenpunkt sich leichter«, weil er nach unten beschleunigt wird, so wie unsereins sich im fallenden Fahrstuhl leichter fühlt.

Wir beschreiben nun die Bewegung des Pendels durch den zeitabhängigen Winkel $\varphi(t)$, der gegen die Abwärtsrichtung gemessen wird: $\varphi = \pi/2$ entspricht der Horizontalen, $\varphi = \pi$ der Aufwärtsrichtung. Außerdem zerlegen wir die Bewegung in einen langsamen Anteil $\psi(t)$ plus eine schnelle, kleine, durch die Bewegung des Aufhängepunktes induzierte Schwingung $\delta(t) = -(z(t)/\ell) \sin \psi$. Dabei ist ℓ die Länge der Pendelstange; die Formel drückt aus, dass eine horizontale Pendelmasse ($\sin \psi = 1$) eine Gegenbewegung zum Aufhängepunkt vollführt, die umso schwächer ist, je länger die Stange ist (für die Herleitung der Formel denken wir uns die Gravitation vorübergehend ausgeschaltet). Steht das Pendel schräg, wird die schnelle Schwankung des Winkels mit dem Faktor $\sin \psi$ gedämpft und verschwindet gänzlich für das aufrecht stehende Pendel ($\sin \psi = 0$). Damit ergibt sich

$$\varphi(t) = \psi(t) - \frac{a}{\ell} \sin \psi \sin \omega t \ .$$

Da δ klein ist, dürfen wir die Näherung $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$ verwenden: $\sin \varphi = \sin(\psi + \delta) \approx \sin \psi + \delta \cos \psi$.

Berechnen wir nun die zeitlichen Mittelwerte der Drehmomente, die von beiden Kräften (Gravitation und Trägheitskraft) ausgeübt werden. Der zeitliche Mittelwert wird durch spitze Klammern gekennzeichnet. Für das Drehmoment der Gravitation gilt

$$\langle -mg\ell \sin \varphi \rangle = -mg\ell \langle \sin(\psi + \delta) \rangle = -mg\ell \sin \psi \ ,$$

denn der zeitliche Mittelwert von δ ist null. Für das Drehmoment der Trägheitskraft dagegen ergibt sich

$$\begin{aligned} \langle F_{\mathrm{Tr}} \ell \sin \varphi \rangle &= -m\omega^2 a \ell \frac{a}{\ell} \cos \psi \sin \psi \langle \sin^2 \omega t \rangle \\ &= -\frac{1}{2} m a^2 \omega^2 \cos \psi \sin \psi \ , \end{aligned}$$

denn der zeitliche Mittelwert von $\sin^2 \omega t$ ist (im Gegensatz zu dem von $\sin \omega t$) nicht null, sondern 1/2. Für $\psi > \pi/2$ (Pendel steiler als horizontal) ist das gemittelte Drehmoment der Trägheitskraft positiv, strebt also danach, das Pendel aufzurichten. Es übertrifft das Drehmoment der Gravitation, wenn $a^2\omega^2 > 2g\ell$ ist, das heißt, wenn die Maximalgeschwindigkeit $a\omega$ des Aufhängepunktes größer ist als die Geschwindigkeit $\sqrt{2g\ell}$, die ein frei fallender Körper nach der Fallhöhe ℓ (= Pendellänge) erreicht.

sik aus dem Lautsprecher ertönt: Eine vernünftige Näherung an die Tatsachen ist in jedem Fall eine sinusförmige Schwingung. Der soeben geschilderte Effekt verwischt sich also möglicherweise bis zur Unkenntlichkeit. Es hilft nichts, man muss genauer nachsehen.

Ein beschleunigtes Bezugssystem: Es ist zweckmäßig, sich dafür in Gedanken auf den zappelnden Aufhängepunkt zu setzen. Der solcherart auf und ab hüpfende Beobachter darf sich ohne weiteres der Illusion hingeben, er selbst sei in Ruhe und der Rest der Welt hüpfe ab und auf. Allerdings ist sein Bezugssystem gegenüber dem umgebenden Raum beschleunigt und diesem daher nicht gleichberechtigt; aus diesem Grund muss der Beobachter unterstellen, auf die Gegenstände seines Bezugssystems, insbesondere die Pendelmasse, wirke eine Kraft, die so genannte Trägheitskraft. Sie verursacht eine Beschleunigung, die entgegengesetzt gleich der Beschleunigung des bewegten Bezugssystems ist.

Theoretiker verwenden für derartige Kräfte den abwertenden Begriff »Scheinkraft«. Schon richtig: Die Kraft kommt nur durch die willkürliche Wahl des Bezugssystems zu Stande. »Eigentlich« drückt mich im Karussell nicht die Trägheitskraft (die hier »Fliehkraft« heißt) nach außen, sondern die mit der Drehachse fest verbundene Außenseite hindert mich daran, meiner Trägheit folgend tangential davonzufliegen. Aber die Vorstellung mit der Trägheitskraft ist wesentlich einleuchtender – und genauso zulässig, denn sie führt ebenfalls zu einer korrekten Beschreibung der Phänomene.

Für hinreichend schnelle Bewegungen unseres Pendel-Aufhängepunktes kann die Trägheitskraft die Gravitation ohne weiteres übertreffen. Zumindest während eines Teils der Schwingungsperiode zeigt also die Gesamtkraft nach oben, und nichts wäre für das Pendel natürlicher, als nach oben zu fallen und dort hängen zu bleiben. Dass allerdings auch eine Kraft, deren zeitlicher Mittelwert null ist, ein Pendel in die Höhe treiben kann, bedarf näherer Begründung (siehe Kasten).

Moderne, handliche Stichsägen verführen die Physiker zu neuen Experimenten. Man muss den Aufhängepunkt des Pendels nicht unbedingt in der Vertikalen schwingen zu lassen. Eine Schwingung in schräger Richtung veranlasst das Pendel, sich in genau diese Richtung einzustellen. Im Allgemeinen schwingt es langsam um diese Gleichgewichtslage; unter gewissen Umständen kann man Periodenverdopplung oder gar chaotisches Verhalten erzeugen oder zumindest mit dem Computer simulieren – all die interessanten Dinge, zu denen ein nichtlineares dynamisches System fähig ist. ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

On the Dynamic Stabilization of an Inverted Pendulum. Von Eugene I. Butikov in: American Journal of Physics, Bd. 69, Heft 7, S. 755 (2001).

Experimental Study of an Inverted Pendulum. Von H. J. T. Smith und J. A. Blackburn in: American Journal of Physics, Bd. 60, Heft 10, S. 909 (1992).

The Driven Pendulum at Arbitrary Drive Angles. Von Gordon J. VanDalen. Zum Download bereit unter www.arxiv.org, physics, 0211047 (Juni 2003).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Jahresregister 2003

Dieser Index umfasst alle im Jahre 2003 erschienenen Hauptbeiträge (Artikel, Technoskop-Schwerpunkte und Technologie-Reports) sowie deren Autoren. Die Rubriken und Rezensionen sind aus Platzgründen nicht mit aufgenommen, aber im Internet (www.spektrum.de) und im elektronischen Gesamtregister enthalten, das ab Januar 2004 auf CD angeboten wird.

Hauptbeiträge

1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
24-Bit-Rw, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
2DG, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie; Nov. 44
3D, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Abbau von Koffein, Die Alltagsdroge ~; Juni 64
Abschmelzen der Polkappen, Auf dünnem Eis; Feb. 30
Abstammungsbusch, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Abtastrate, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Abwehrzellen, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
ACES-Projekt, Korallengärten in kalten Tiefen; Feb. 56
Adenosinrezeptor, Die Alltagsdroge Koffein; Juni 64
adulte Stammzellen, Potente Zellen; Mai 66
Afrika, Der Ursprung lag in ~; März 38
Akkretionskeil, Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
Akkulturation, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
aktive Galaxienkerne, Galaxien im Ausnahmezustand; Sept. 35
Albertus Magnus – der große Neugierige; Nov. 70
Algorithmentheorie, Ein Vierteljahrhundert Informatik; Sept. 20
Alkohol fürs Herz; Okt. 62
Alltagsdroge, Die ~ Koffein; Juni 64
Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Altern, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
alternative Energie, Ausbruch aus der Nische; April 80
Altruismus, Hilfsbereitschaft unter Fremden; Aug. 26
Aluminium, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Amphibien, Verstümmelt durch Gülle; April 58
angeborene Immunität, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Angriff der Klon-Musiker; März 81
anomale Röntgen-Pulsare, Magnetare; Mai 56
Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
antarktische Eisdecke, Auf dünnem Eis; Feb. 30
anthropisches Prinzip, Paralleluniversen; Aug. 34
Antigen-Präsentation, Impfen gegen Krebs; April 38
antikes Rom, Der Wein der Römer; Dez. 86
Antikörper, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Apoplex, Die Uhr tickt; Jan. 71
Arbeitsgedächtnis, Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
Ardipithecus, Wer waren die ersten Hominiden?; Sept. 46
Artenschutz, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Arteriosklerose, Alkohol fürs Herz; Okt. 62
ASCI Purple, »Der Earth Simulator hat uns aufgeweckt«; Juli 74
Assur, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Atomausstieg, »Der deutsche ~ findet kaum Nachahmer«; April 86
Atombombe, Schmutzige Bomben als Terrorwaffe; März 28
Atombombe, Neue Bedrohungsszenarien; März 32
Atomkraft, »Die Kernenergie ist nur begrenzt beherrschbar«; April 88
ATP, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
Audio, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Audio, Angriff der Klon-Musiker; März 81
Audio-CD, Hören Sie den Unterschied?; März 87
Auf dünnem Eis; Feb. 30
Aufputschmittel, Die Alltagsdroge Koffein; Juni 64
aufrechter Gang, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
aufrechter Gang, Wer waren die ersten Hominiden?; Sept. 46
Ausbruch aus der Nische; April 80
Ausbrüche von Gletscherseen, Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
australischer Wurzelkrebs, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Australopithecus, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Autoimmunkrankheiten, Impfen gegen Krebs; April 38
Autounfall, Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?; Jan. 70
Avicenna, Ein Muslim im Kirchenfenster; Jan. 84
Azteken, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Azteken, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
Babylon, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Bagdad, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Beatles, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Bernstein, Gladiatoren: Gespenstische Räuber; Feb. 64
Bevölkerungsdichte, Hilfsbereitschaft unter Fremden; Aug. 26
Bild und Ton im Takt; März 85
Billard-Modell, Chaos in der Quantenwelt; März 70
Biometrie, Der vermessene Mensch; Juli 76
Biometrie, Vom Datensatz zur Unperson; Juli 80
Biometrie, Können diese Augen lügen?; Juli 81
Biometrie, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Biometrie, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Biometrie, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Biometrie, Zeig mir, wie du tippst, und ich sag dir, wer du bist; Aug. 71
Bipolar-Transistor, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Bit-Domäne, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Blastocysten, Potente Zellen; Mai 66
Blaue Vagabunden, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Blindsehen, Sehtraining bei Teilblindheit; Sept. 58
Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
BLT, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Blue Planet, »Der Earth Simulator hat uns aufgeweckt«; Juli 74
Blutdrucksteigerung, Die Alltagsdroge Koffein; Juni 64
Blutgerinnsel, Die Uhr tickt; Jan. 71
Blutung, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Bodyguards, Die ~ des Körpers; Nov. 28
Bomblet, Satellitengelenkte Waffen; April 66
Bose-Einstein-Kondensat, Ultrakalte Atome; Juni 28
Bosonen, Strings – Urbausteine der Natur?; Feb. 24
Bosonen, Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Brennstoffzelle, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Brutverhalten, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
cacaloxochitl, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Caesar, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
»Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Caruso lebt; März 86
Cato, Der Wein der Römer; Dez. 86
CEPH, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Cepheiden, Das expandierende Universum; Juni 46
Champagner, Der Charme des ~s; Juli 52
Chaos in der Quantenwelt; März 70
Chaostheorie, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Chargaff, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Charme, Der ~ des Champagners; Juli 52
Chili, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Chip, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Chip, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Chipkarte, Können diese Augen lügen?; Juli 81
chirurgische Kriegsführung, Der Mythos vom sauberen Krieg; April 68
CMOS, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Co-Suppresion von Genen, Zensur in der Zelle; Okt. 52
Columella, Der Wein der Römer; Dez. 86
Compact Disc, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Compact Disc, Hören Sie den Unterschied?; März 87
Computer Grape-6, Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
Computertraining, Sehtraining bei Teilblindheit; Sept. 58
Conquista, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
Cortés, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
Crema, Von der Bohne zum Espresso; Mai 82
Crick, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Cytokine, Impfen gegen Krebs; April 38
Dahlie, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Dampfturbine, Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Darminhalt, Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi; Juli 30
Datenschutz, Vom Datensatz zur Unperson; Juli 80
Datenspeicher, Unterwegs zum Nanolaufwerk; Mai 90
Datenspeicher, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
De bello Gallico, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
defrutum, Der Wein der Römer; Dez. 86
Delirium, »Die Stimme hat es mir befohlen«; Jan. 68
dendritische Zellen, Impfen gegen Krebs; April 38
Dielektrischer Durchbruch, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Dig Tsho, Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
Digitalisierung, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Digitalisierung, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Digitalisierung, Caruso lebt; März 86
Dinosaurier, Zuerst kam die Feder; Okt. 32
DNA-Marker, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
DNA-Sequenzierung, Die Doppelhelix war nur der Anfang; April 78
DNA-Struktur, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Donaldson-Vermutung, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Doppelgänger, Paralleluniversen; Aug. 34
Doppelhelix, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Doppelhelix, Die ~ war nur der Anfang; April 78
Druckverlauf, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Druiden, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Dryopithecus, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
DSP, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
DSP, Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Dunkle Energie, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
Dunkle Materie, Die Suche nach ~r ~; Okt. 44
Dunkle Materie, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
DVD, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Earth Simulator, »Der ~ ~ hat uns aufgeweckt«; Juli 74
EC-Zellen, Potente Zellen; Mai 66
Editor, Angriff der Klon-Musiker; März 81
Effektgerät, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Eichsymmetrien, Strings – Urbausteine der Natur?; Feb. 24
Eisen zur Meeresdüngung, Der unsichtbare Wald im Meer; Juni 56
Eismann, Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi; Juli 30
Eisströme, Auf dünnem Eis; Feb. 30
Eiszeiten, Klarheit über das Klima; April 20
elastischer Stoß, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Elektroden-Arrays, Roboter steuern von Geistes Hand; Jan. 74
Elektrostatische Aufladung, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Elterninvestment, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
embryonale Stammzellen, Potente Zellen; Mai 66

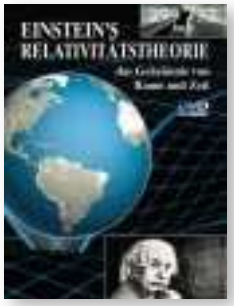
Energiebedarf, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
Energiepolitik, »Die vergessene Säule der ~«; April 84
Enrolment, Der vermessene Mensch; Juli 76
Entladung, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Entropie, Das holografische Universum; Nov. 34
Entsorgung, »Die Kernenergie ist nur begrenzt beherrschbar«; April 88
Entwässerung von Sedimenten, Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
Entzündungshemmer, Süße Medizin; Feb. 46
Epilepsie, Roboter steuern von Geistes Hand; Jan. 74
Erbschäden, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Erdbebenvorhersage, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Erdpech, Der Wein der Römer; Dez. 86
Ereignishorizont, Das holografische Universum; Nov. 34
Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Ernährung, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
Ernährung, Macht gesunde ~ krank?; März 58
Ernährungsvielfalt, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
»Die Mehrlinge sind das größte Problem«; Dez. 42
ESD, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Espresso, Von der Bohne zum ~; Mai 82
Eurasien, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
Eutrophierung der Ozeane, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
EUV, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Eva-Hypothese, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Eva-Hypothese, Der Ursprung lag in Afrika; März 38
Evolution des Menschen, Die ~ ~ ~; Jan. 22
Evolution der Hautfarben, Die ~ ~ ~; Juni 38
Evolution der Hominiden, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
Exciter, Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Expansion des Kosmos, Das expandierende Universum; Juni 46
Expansion des Kosmos, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
extrasolare Planeten, Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
Falerner, Der Wein der Römer; Dez. 86
Farbkontrast, Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?; Mai 74
Fehlbildungen, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Fehlbildungen, »Die Mehrlinge sind das größte Problem«; Dez. 42
Femtosekunden-Spektroskopie, Der Widerspenstigen Zähmung; Juli 24
Fenugrec, Der Wein der Römer; Dez. 86
FeRAM, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Fermionen, Strings – Urbausteine der Natur?; Feb. 24
Fermionen, Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Ferroelektrika, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Festoxid, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Festplatte, Die ~ als Bandmaschine; März 78
Festplatte, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Filmmusik, Bild und Ton im Takt; März 85
Filter, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Filter, Caruso lebt; März 86
Fingerabdruck, Der vermessene Mensch; Juli 76
Fingerabdruck, Vom Datensatz zur Unperson; Juli 80
flaches Universum, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
Flächenlautsprecher, Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Flare, Magnetare; Mai 56
Fliegen, Zuerst kam die Feder; Okt. 32
Folsäure, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
Foraminiferen, Klarheit über das Klima; April 20
formale Sprache, Die Kolam-Figuren Südindiens; Juni 74
Formant, Angriff der Klon-Musiker; März 81
Formant, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Fortpflanzung, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Fourier-Transformation, Caruso lebt; März 86
Franklin, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Free-Floater, Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
freie Radikale, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
Frösche, Verstümmelt durch Gülle; April 58
Fullerene, Chaos in der Quantenwelt; März 70
Funkenstrecke, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Funktionsschicht, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
galaktisches Zentrum, Das Zentrum der Milchstraße; April 26
Galaxien im Ausnahmezustand; Sept. 35
Galaxienentwicklung, Galaxien im Ausnahmezustand; Sept. 35
Gallien, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Gallien, Der Wein der Römer; Dez. 86
Galliumarsenid, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Gammastrahlung, Magnetare; Mai 56
Gammastrahlungsausbrüche, Die stärksten Explosionen im Universum; März 48
Gangotri-Gletscher, Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Gasblasen, Der Charme des Champagners; Juli 52
Gasturbine, Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Geburtsschäden, »Die Mehrlinge sind das größte Problem«; Dez. 42
Geflügelpest, Die siegreiche Strategie des Grippevirus; Aug. 48
Geheimzahl, Vom Datensatz zur Unperson; Juli 80
Gehirn, Geziefer im ~; Mai 98
Gehirnforschung, Die Revolution in der ~; März 23
Gehirngröße, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
Gehirn-Maschine-Interfaces, Roboter steuern von Geistes Hand; Jan. 74
Gehirnplastizität, Sehtraining bei Teilblindheit; Sept. 58
Gele, Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Genabschaltung, Zensur in der Zelle; Okt. 52
Genethon, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
genetischer Code, Die Doppelhelix war nur der Anfang; April 78
Gensequenzierung, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Geothermie, Ausbruch aus der Nische; April 80
Germanien, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Geschwindigkeitsbeschränkung, Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?; Jan. 70
Gesichtserkennung, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Gesichtsfeld, Sehtraining bei Teilblindheit; Sept. 58
gesunde Ernährung, Macht ~ ~ krank?; März 58
Gesundheit, Alkohol fürs Herz; Okt. 62
Geziefer im Gehirn; Mai 98
Gilgamesch, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Gitarre, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Gladiatoren: Gespenstische Räuber; Feb. 64
Glätten, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Glasgow Coma Scale, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Gletschermann, Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi; Juli 30
Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
Global Grid Forum, Grid Computing in Deutschland; Juli 72
globale Erwärmung, Auf dünnem Eis; Feb. 30
Globus Toolkit, Rechenleistung aus der Steckdose; Juli 66
Glucose, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
glykämischer Index, Macht gesunde Ernährung krank?; März 58
Glykolipide, Süße Medizin; Feb. 46
Glykoproteine, Süße Medizin; Feb. 46
Golgi-Apparat, 3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie; Nov. 44
GPS, Satellitengelenkte Waffen; April 66
Grabbeigabe, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
grandiose Genom-Projekt, Das ~ ~; Aug. 20
granulare Medien, Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Grid Computing, Rechenleistung aus der Steckdose; Juli 66
Grid Computing in Deutschland; Juli 72
Grippevirus, Die siegreiche Strategie des ~; Aug. 48
Grippevirus, »Den Teufel nicht für Beelzebub vernachlässigen«; Aug. 52
Großmütter, Warum gibt es ~?; Jan. 48
Großstädter, Hilfsbereitschaft unter Fremden; Aug. 26
GuD, Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Handschrift, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71

Im Dezember bei wissenschaft-online

wissenschaft-online

Wie entsteht ein Lexikon? Insbesondere ein 15-bändiges Fachlexikon? wissenschaft-online fragte jemanden, der es wissen muss: Rolf Sauermost, der seit vielen Jahren den Aufbau des Lexikons der Biologie betreut. Zu lesen unter www.wissenschaft-online.de/interviews

»Gleiches Wissen für alle« – unter diesem Motto ermöglicht die sueddeutsche.de den ganzen Dezember über einen Freizugang zum Lexikon der Physik. Das Werk informiert über alle Bereiche der Physik: von den klassischen Themen wie Akustik und Mechanik bis hin zu modernen Forschungsgebieten wie der Laser-, Teilchen- und Festkörperphysik. Die Internetadresse der Lexika: www.wissenschaft-online.de/lexika



Physik ohne Einstein ist heute kaum vorstellbar. Seine Theorien zu verstehen und zu vermitteln ist nach wie vor nicht einfach. Ein schönes Beispiel neuer Wege der Wissensvermittlung zeigt die DVD »Einsteins Relativitätstheorie«: www.science-shop.de/einstein

www.wissenschaft-online.de

harntreibender Effekt, Die Alltagsdroge Koffein; Juni 64
Hauptreihenstern, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Hautfarbe, Die Evolution der ~n; Juni 38
Hautkrebs, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
Heizkosten, »Die vergessene Säule der Energiepolitik«; April 84
Helligkeitskontrast, Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?; Mai 74
Hendrix, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Herkunft von Ötzi, Neue Befunde: Die ~ ~ ~; Juli 30
Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Macht gesunde Ernährung krank?; März 58
Herzinfarkt, Alkohol fürs Herz; Okt. 62
Herzinfarkt-Reparatur, Potente Zellen; Mai 66
Herzvorläuferzellen, Potente Zellen; Mai 66
Higgs-Boson, Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Hilfsbereitschaft unter Fremden; Aug. 26
Himalaya-Gletscher, Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
Hirnfunktionen, Die Revolution in der Gehirnforschung; März 23
Hiscore, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
HIV, Impfen gegen Krebs; April 38
hochangereichertes Uran, Neue Bedrohungsszenarien; März 32
Hochdorf, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Höchstleistungsrechner, »Der Earth Simulator hat uns aufgeweckt«; Juli 74
Hören Sie den Unterschied?; März 87
holografische Universum, Das ~ ~; Nov. 34
Hominiden, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Hominiden, Der Ursprung lag in Afrika; März 38
Hominiden, Wer waren die ersten ~ ?; Sept. 46
Hongkong, Die siegreiche Strategie des Grippevirus; Aug. 48
Hot-Dry-Rock, Ausbruch aus der Nische; April 80
Hubble-Konstante, Das expandierende Universum; Juni 46
Hubble-Konstante, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
Huitzilopochtli, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
Humangenom-Projekt, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Identifikation, Der vermessene Mensch; Juli 76
Identität der Quanten, Die ~ ~ ~; Jan. 56
Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Immunsystem, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Impfen gegen Krebs; April 38
Impfstoffe, Süße Medizin; Feb. 46
»In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«; April 90
In-Depth-Investigation, Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?; Jan. 70
In-vitro-Fertilisation, Krank aus der Retorte; Dez. 36
In-vitro-Fertilisation, »Die Mehrlinge sind das größte Problem«; Dez. 42
Individualität, Die Identität der Quanten; Jan. 56
Infarktkern, Die Uhr tickt; Jan. 71
Inflation, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
Inflatonfeld, Paralleluniversen; Aug. 34
Influenza, Die siegreiche Strategie des Grippevirus; Aug. 48
Influenza, »Den Teufel nicht für Beelzebub vernachlässigen«; Aug. 52
Informatik, Spielregeln für Quantencomputer; April 19
Informatik, Ein Vierteljahrhundert ~; Sept. 20
Information im Kosmos, Das holografische Universum; Nov. 34
Inhaltsstoffe von Kaffee, Von der Bohne zum Espresso; Mai 82
Insektenordnung, Gladiatoren: Gespenstische Räuber; Feb. 64
Intensivstation, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Ionenstrahl, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Irak, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Irak-Krieg, Der Mythos vom sauberen Krieg; April 68
Iris, Können diese Augen lügen?; Juli 81
islamisch-arabische Wissenschaft, Ein Muslim im Kirchenfenster; Jan. 84
Isotopenanalyse, Klarheit über das Klima; April 20
Iter, »In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«; April 90
Izmit-Beben, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Iztapalapa, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
JASSM (Joint Air-to-Surface Stand-off Missile), Satellitengelenkte Waffen; April 66
JDAM (Joint Direct Attack Munition), Satellitengelenkte Waffen; April 66
»Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Jenseitsglaube, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
JSOW (Joint Standoff Weapon), Satellitengelenkte Waffen; April 66
Kaffeeanbau, Von der Bohne zum Espresso; Mai 82
Kakao, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Kalorienreduktions-Mimetikum, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
Kalte Dunkle Materie, Die Suche nach Dunkler Materie; Okt. 44
Katzenpheromone, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Kelten, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Kelter, Der Wein der Römer; Dez. 86
Kernenergie, »Der deutsche Atomausstieg findet kaum Nachahmer«; April 86
Kernenergie, »Die ~ ist nur begrenzt beherrschbar«; April 88
Kernfusion, »In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«; April 90
Kernwaffen, Neue Bedrohungsszenarien; März 32
Kindersterblichkeit, Warum gibt es Großmütter?; Jan. 48
Klang, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Klangfeld, Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Klarheit über das Klima; April 20
Kleinhirn, Rätsel ~; Nov. 60
Klimageschichte, Klarheit über das Klima; April 20
Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
Klimawandel, Auf dünnem Eis; Feb. 30
Knackser, Caruso lebt; März 86
Können diese Augen lügen?; Juli 81
Koffein, Die Alltagsdroge ~; Juni 64
Kohärer von Branly, Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Kohlendioxid, Der Charme des Champagners; Juli 52
Kohlendioxid-Kreislauf, Der unsichtbare Wald im Meer; Juni 56
kohlendioxidhaltige Getränke, Der Charme des Champagners; Juli 52
Kohlenhydrate, Süße Medizin; Feb. 46
Kolam-Figuren, Die ~ Südindiens; Juni 74
Komplexitätstheorie, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Komprimierung, Hören Sie den Unterschied?; März 87
Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Koordination der Bewegung, Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
Korallengärten in kalten Tiefen; Feb. 56
koronare Herzkrankheit, Alkohol fürs Herz; Okt. 62
kosmische Entfernungsleiter, Das expandierende Universum; Juni 46
kosmische Inflation, Paralleluniversen; Aug. 34
kosmologische Modelle, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
Kraftwerke, Ausbruch aus der Nische; April 80
Kraftwerke, »Die vergessene Säule der Energiepolitik«; April 84
Kraftwerke, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Kraftwerke, Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Kraftwerke, »In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«; April 90
Krank aus der Retorte; Dez. 36
Krankheiten von Ötzi, Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi; Juli 30
Krebsbekämpfung, Süße Medizin; Feb. 46
Krebs-Impfstoffe, Impfen gegen Krebs; April 38
Kreidezeitklima, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
kritische Dichte, Ein Universum voll dunkler Rätsel; Dez. 28
kritische Phänomene, Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Krummhörn, Warum gibt es Großmütter?; Jan. 48
Kryo-Elektronentomographie, 3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie; Nov. 44
Kryptographie, Ein Vierteljahrhundert Informatik; Sept. 20
künstliche Befruchtung, »Die Mehrlinge sind das größte Problem«; Dez. 42
künstliche Zeugung, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Kugelsternhaufen, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Kugelsternhaufen, Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
Kulturgeschichte, Ein Muslim im Kirchenfenster; Jan. 84
Kupfer, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Lahnau-Waldgirmes, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Langerhans-Zellen, Impfen gegen Krebs; April 38
Laserkühlung, Ultrakalte Atome; Juni 28
Laufwerke, Unterwegs zum Nanolaufwerk; Mai 90
Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Lebend-Test, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Lebensspuren, Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Leichtwasserreaktor, »Der deutsche Atomausstieg findet kaum Nachahmer«; April 86
Leitungen, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Lektine, Süße Medizin; Feb. 46
Lenkwaffen, Satellitengelenkte Waffen; April 66
Lepra, Impfen gegen Krebs; April 38
Lithografie, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Lithografie, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Lyse, Die Uhr tickt; Jan. 71
lysosomale Speicherkrankheiten, Süße Medizin; Feb. 46
Macht gesunde Ernährung krank?; März 58
Magnetare; Mai 56
magnetische Sterne, Magnetare; Mai 56
magnetooptische Falle, Ultrakalte Atome; Juni 28
Maische, Der Wein der Römer; Dez. 86
Mannigfaltigkeiten, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Mantophasmatodea, Gladiatoren: Gespenstische Räuber; Feb. 64
Mars Exploration Rover, Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Mars Global Surveyor, Die unirdischen Landschaften des Mars; Juli 42
Mars Odyssee, Die unirdischen Landschaften des Mars; Juli 42
Mars-Express, Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Marsforschung, Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Marsoberfläche, Die unirdischen Landschaften des Mars; Juli 42
Maske, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Massenvernichtungsmittel, Der Mythos vom sauberen Krieg; April 68
MCFC, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Medikamente, Süße Medizin; Feb. 46
Meeresdüngung, Der unsichtbare Wald im Meer; Juni 56
Meeresspiegelanstieg, Auf dünnem Eis; Feb. 30
Mehrlinge, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Menschenaffen, Das Zeitalter der ~; Dez. 58
Menschenevolution, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
Menschwerdung, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
Menschwerdung, Wer waren die ersten Hominiden?; Sept. 46
Menschwerdung, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
Methanquellen, Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
Mexiko, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
MHC-Moleküle, Impfen gegen Krebs; April 38
MHC-Moleküle, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Microraptor, Zuerst kam die Feder; Okt. 32
microRNAs, Zensur in der Zelle; Okt. 52
MIDI, Angriff der Klon-Musiker; März 81
Migration, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
Milankovic-Theorie, Klarheit über das Klima; April 20
Milankovic-Zyklen, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
Milchstraße, Das Zentrum der ~; April 26
Miozän, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
Missbildungen, Verstümmelt durch Gülle; April 58
Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Mitochondrien, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
Mittelalter, Albertus Magnus – der große Neugierige; Nov. 70

Mittelamerika, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Mittelmeerrücken, Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
moderner *Homo sapiens*, Der Ursprung lag in Afrika; März 38
molekulare Uhr, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Molekularforschung, Die Revolution in der Gehirnforschung; März 23
Monocyten, Impfen gegen Krebs; April 38
Monogamie, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Montezuma, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Montezuma, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
MOSFET, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Most, Der Wein der Römer; Dez. 86
Motorik, Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
MP3, Hören Sie den Unterschied?; März 87
MPEG-4, Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Multiorganversagen, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
multiregionales Modell, Der Ursprung lag in Afrika; März 38
Multiversum, Paralleluniversen; Aug. 34
Musikdateien, Hören Sie den Unterschied?; März 87
Musikwiedergabe, Konzertsaal im Wohnzimmer; März 88
Muslim, Ein ~ im Kirchenfenster; Jan. 84
Mythos, Der ~ vom sauberen Krieg; April 68
Nabada, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Nachbeben, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Nahrungsbestandteile, Macht gesunde Ernährung krank?; März 58
Namibia, Gladiatoren: Gespenstische Räuber; Feb. 64
Nanokristall, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Nanolaufwerke, Unterwegs zum Nanolaufwerk; Mai 90
Neandertaler, Die Evolution des Menschen; Jan. 22
Neandertaler, Der Ursprung lag in Afrika; März 38
Neue Bedrohungsszenarien; März 32
Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi; Juli 30
Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Neuroprothesen, Roboter steuern von Geistes Hand; Jan. 74
Neutralinos, Die Suche nach Dunkler Materie; Okt. 44
Neutronensterne, Magnetare; Mai 56
Nichtlinearität, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Nimrud, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Ninive, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Nordanatolische Verwerfung, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Nordatlantik, Korallengärten in kalten Tiefen; Feb. 56
Notfall-Räderwerk, Das ~; Jan. 64
Nuklear-Terrorismus, Schmutzige Bomben als Terrorwaffe; März 28
Nutzsignal, Caruso lebt; März 86
Nyquist-Theorem, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Ökoinstitut, »Die Kernenergie ist nur begrenzt beherrschbar«; April 88
Ötzi, Neue Befunde: Die Herkunft von ~; Juli 30
Oligosaccharide, Süße Medizin; Feb. 46
Oper, Caruso lebt; März 86
Opfer, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
optische Täuschung, Richtiges Sehen – eine ~ ~?; Mai 74
optischer Sirup, Ultrakalte Atome; Juni 28
Orrorin, Wer waren die ersten Hominiden?; Sept. 46
Ouranopithecus, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
Out-of-Africa-Modell, Der Ursprung lag in Afrika; März 38
Ozeanische Anoxische Ereignisse, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
Ozeanzirkulation, Klarheit über das Klima; April 20
Pandemien, Die siegreiche Strategie des Grippevirus; Aug. 48
Paralleluniversen; Aug. 34
Parasiten, Verstümmelt durch Gülle; April 58
Parasiten, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Parks, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Partnerwahl, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Passwort, Der vermessene Mensch; Juli 76
Patron-Klient, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Pauling, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
PEM, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Penumbra, Die Uhr tickt; Jan. 71
periphere Immuntoleranz, Impfen gegen Krebs; April 38
Perkolation, Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Perlen, Der Charme des Champagners; Juli 52
Pflanzenfunde, Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi; Juli 30
Phasenlithografie, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Phasenraum, Chaos in der Quantenwelt; März 70
Photovoltaik, Ausbruch aus der Nische; April 80
Phytoplankton, Der unsichtbare Wald im Meer; Juni 56
Piersport, Der Wein der Römer; Dez. 86
Pigmente, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
PIN, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Planck'sches Strahlungsgesetz, Die Identität der Quanten; Jan. 56
Planck-Fläche, Das holografische Universum; Nov. 34
Planetare, Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
Plasma, »In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«; April 90
Plasma, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Plastizität, Sehtraining bei Teilblindheit; Sept. 58
Plinius, Der Wein der Römer; Dez. 86
Pluripotenz, Potente Zellen; Mai 66
Plutonium, Neue Bedrohungsszenarien; März 32
POD, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
polyedrische Topologie, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Polymerelektrolyt, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Polymorphismen, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Polytrauma, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Porcupine-Becken, Korallengärten in kalten Tiefen; Feb. 56
Potente Zellen; Mai 66
Polymerase-Kettenreaktion, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Presskorb, Der Wein der Römer; Dez. 86
Project Seahorse, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
provinzialrömisch, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Psychoakustik, Hören Sie den Unterschied?; März 87
Psychose, »Die Stimme hat es mir befohlen«; Jan. 68
Psylock, Zeig mir, wie du tippst, und ich sag dir, wer du bist; Aug. 71
Pulsare, Magnetare; Mai 56
PZT, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Qatna, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Quanten-Identität, Die Identität der Quanten; Jan. 56
Quantenbits, Spielregeln für Quantencomputer; April 19
Quantenchaos, Chaos in der Quantenwelt; März 70
Quantencomputer, Spielregeln für ~; April 19
Quantencomputer, Ein Vierteljahrhundert Informatik; Sept. 20
Quantentheorie, Paralleluniversen; Aug. 34
Quarks, Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Qubits, Spielregeln für Quantencomputer; April 19
Querschnittlähmung, Roboter steuern von Geistes Hand; Jan. 74
radiologische Waffen, Schmutzige Bomben als Terrorwaffe; März 28
radiologische Waffen, Neue Bedrohungsszenarien; März 32
Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
RAM, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Rasterkraftmikroskop, Unterwegs zum Nanolaufwerk; Mai 90
Rastertunnelmikroskopie, Der Widerspenstigen Zähmung; Juli 24
Raubsaurier, Zuerst kam die Feder; Okt. 32
Rauigkeit, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Raumsonden, Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Rauschen, Caruso lebt; März 86
Reagenzglasbefruchtung, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Reagenzglasbefruchtung, »Die Mehrlinge sind das größte Problem«; Dez. 42
Reaktionsdynamik, Der Widerspenstigen Zähmung; Juli 24
Rebstock, Der Wein der Römer; Dez. 86
Rechenleistung aus der Steckdose; Juli 66
Red Storm, »Der Earth Simulator hat uns aufgeweckt«; Juli 74
Reflektometer, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Regeneration, Die Revolution in der Gehirnforschung; März 23
Regengott, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Regulation des Schlafbedürfnisses, Die Alltagsdroge Koffein; Juni 64
Rehabilitation, Die Uhr tickt; Jan. 71
Religion, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Religion, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
remanente Polarisation, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Replay, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Reproduktionserfolg, Warum gibt es Großmütter?; Jan. 48
Restaurierung, Caruso lebt; März 86
Restriktionsenzyme, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Retortenbaby, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Reverse Transkriptase, Das grandiose Genom-Projekt; Aug. 20
Revolution, Die ~ in der Gehirnforschung; März 23
Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?; Mai 74
RISC, Zensur in der Zelle; Okt. 52
Risikoprognose für Erdbeben, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
RNA-Interferenz, Zensur in der Zelle; Okt. 52
Roboter steuern von Geistes Hand; Jan. 74
Röhren-Glühen, Virtuelles ~; März 82
Röntgenquellen, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Röntgenstrahlung, Magnetare; Mai 56
Röstung von Kaffeebohnen, Von der Bohne zum Espresso; Mai 82
Rötgenstrukturanalyse, 3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie; Nov. 44
Rollentausch, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Romanisierung, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Rote Riesen, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Ruheumsatz, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
Sagittarius A*, Das Zentrum der Milchstraße; April 26
Sahelanthropus, Wer waren die ersten Hominiden?; Sept. 46
Salbei, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Sample, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Sample, Angriff der Klon-Musiker; März 81
San-Andreas-Graben, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Sanddünen, Mit Zufall und Statistik zum Ziel; Okt. 26
Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
SARS, Die siegreiche Strategie des Grippevirus; Aug. 48
SARS, »Den Teufel nicht für Beelzebub vernachlässigen«; Aug. 52
Satellitengelenkte Waffen; April 66
Saugwurm, Verstümmelt durch Gülle; April 58
Schaumblasen, Der Charme des Champagners; Juli 52
Schellack, Caruso lebt; März 86
Schildkröten-Geometrie, Die Kolam-Figuren Südindiens; Juni 74
Schiphol, Können diese Augen lügen?; Juli 81
Schiphol, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Schizophrenie, »Die Stimme hat es mir befohlen«; Jan. 68
Schlaganfall, Die Uhr tickt; Jan. 71
Schlammvulkane, Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
Schleifen, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
Schmelzkarbonat, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Schmutzige Bomben als Terrorwaffe; März 28
Schockraum, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Schwangerschaft, Krank aus der Retorte; Dez. 36
Schwarze Löcher, Die stärksten Explosionen im Universum; März 48
Schwarze Löcher, Galaxien im Ausnahmezustand; Sept. 35
Schwarze Löcher, Das holografische Universum; Nov. 34
Schwarzes Loch, Das Zentrum der Milchstraße; April 26
Schwarzschiefersedimente, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48

Schwiegermutter, Warum gibt es Großmütter?; Jan. 48
sedimentärer Vulkanismus, Schlote, die Schlamm statt Feuer speien; Jan. 38
Seepferdchen, Bedrohte ~; Dez. 78
Sehtraining bei Teilblindheit; Sept. 58
Semiquantenchaos, Chaos in der Quantenwelt; März 70
Sepsis, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Sequenzer, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Sequenzer, Angriff der Klon-Musiker; März 81
Sequenzer, Bild und Ton im Takt; März 85
sexuelle Selektion, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Sicherheit, Der vermessene Mensch; Juli 76
siegreiche Strategie, Die ~ ~ des Grippevirus; Aug. 48
Signatur, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Silencing, Zensur in der Zelle; Okt. 52
Silicon-on-Insulator, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Silizium, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Silizium, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Sinnesempfindung, Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
siRNAs, Zensur in der Zelle; Okt. 52
Sivapithecus, Das Zeitalter der Menschenaffen; Dez. 58
SOFC, Das Kraftwerk im Keller; April 85
SOI, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Solarthermie, Ausbruch aus der Nische; April 80
Sound, Die Festplatte als Bandmaschine; März 78
Sozialverhalten, Hilfsbereitschaft unter Fremden; Aug. 26
Spannungsverlagerung im Boden, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Speicherkarten, Unterwegs zum Nanolaufwerk; Mai 90
Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Spielregeln für Quantencomputer; April 19
Sprachverarbeitung, Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
Squids, Chaos in der Quantenwelt; März 70
stärkste Explosionen, Die ~n ~ im Universum; März 48
Stammzellgesetz, Potente Zellen; Mai 66
Standarddrink, Alkohol fürs Herz; Okt. 62
Standardmodell, Strings – Urbausteine der Natur?; Feb. 24
Standardmodell, Neue Physik jenseits des ~s; Sept. 26
Starbursts, Galaxien im Ausnahmezustand; Sept. 35
steinige Weg, Der ~ ~ zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
Stepper, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Sternentstehungsgebiete, Galaxien im Ausnahmezustand; Sept. 35
Sternkollisionen, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Stimme, »Die ~ hat es mir befohlen«; Jan. 68
Stimmerkennung, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Strahlenschutz, Schmutzige Bomben als Terrorwaffe; März 28
Streifenprojektion, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Stress-Triggering, Lauschangriff auf seismisches Geflüster; Nov. 52
Strings – Urbausteine der Natur?; Feb. 24
Stromverbund, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Studiotechnik, Bild und Ton im Takt; März 85
Sub-Braune Zwerge, Planeten als Einzelgänger; Feb. 38
Suche, Die ~ nach Dunkler Materie; Okt. 44
Süße Medizin; Feb. 46
Suizid, »Die Stimme hat es mir befohlen«; Jan. 68
Sula-Rücken, Korallengärten in kalten Tiefen; Feb. 56
Supercomputer, »Der Earth Simulator hat uns aufgeweckt«; Juli 74
Supernovae, Das expandierende Universum; Juni 46
superparaelektrisches Limit, 1 Bit = 1 Atom; Okt. 78
Supersymmetrie, Strings – Urbausteine der Natur?; Feb. 24
Supersymmetrie, Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Supersymmetrie, Die Suche nach Dunkler Materie; Okt. 44
Suprafluidität, Ultrakalte Atome; Juni 28
supramolekulare Chemie, Der Widerspenstigen Zähmung; Juli 24
T-Zellrezeptoren, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Tacitus, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Täuschung, Richtiges Sehen – eine optische ~ ?; Mai 74
tamilische Volkskunst, Die Kolam-Figuren Südindiens; Juni 74
Tarfaya-Becken, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
Tastatur, Zeig mir, wie du tippst, und ich sag dir, wer du bist; Aug. 71
Teilblindheit, Sehtraining bei ~; Sept. 58
Teilchendetektoren, Die Suche nach Dunkler Materie; Okt. 44
Teilchenphysik, Neue Physik jenseits des Standardmodells; Sept. 26
Teleportation, Spielregeln für Quantencomputer; April 19
Template, Der vermessene Mensch; Juli 76
Template, Können diese Augen lügen?; Juli 81
Template, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Template, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
Template, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Template, Zeig mir, wie du tippst, und ich sag dir, wer du bist; Aug. 71
Tempolimit, Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?; Jan. 70
Tenochtitlan, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Tenochtitlan, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
Teratokarzinome, Potente Zellen; Mai 66
Terrorismus, Neue Bedrohungsszenarien; März 32
Tetzcotzinco, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Teufel, »Den ~ nicht für Beelzebub vernachlässigen«; Aug. 52
Texcoco, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Texcocosee, Von den Pocken besiegt; Okt. 72
therapeutisches Klonen, Potente Zellen; Mai 66
thermischer Durchbruch, Blitzableiter für Mikrochips; Juni 82
Theropoden, Zuerst kam die Feder; Okt. 32
Tiefwasserkorallen, Korallengärten in kalten Tiefen; Feb. 56
Tippdynamik, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Tippverhalten, Zeig mir, wie du tippst, und ich sag dir, wer du bist; Aug. 71
Tlaloc, Gartenkünstler in der Neuen Welt; Okt. 70
Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Toll-Rezeptoren, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Tollwut, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Totengeist, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Toxoplasmose, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Transmutation, »Die Kernenergie ist nur begrenzt beherrschbar«; April 88
Transplantatabstoßung, Die Bodyguards des Körpers; Nov. 28
Treibhauseffekt, »Die vergessene Säule der Energiepolitik«; April 84
Treibhauseffekt, »Der deutsche Atomausstieg findet kaum Nachahmer«; April 86
Treibhauseffekt, Klimakapriolen der Kreidezeit; Dez. 48
Tretbottich, Der Wein der Römer; Dez. 86
Treverer, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Trier, Als die Gallier Römer wurden; Feb. 72
Tsho Rolpa, Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
Turbinenschaufel, Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Übergewicht, Macht gesunde Ernährung krank?; März 58
Überlebenschancen, Warum gibt es Großmütter?; Jan. 48
Uhr, Die ~ tickt; Jan. 71
Ultrakalte Atome; Juni 28
Ultraviolett, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Umweltschäden, Verstümmelt durch Gülle; April 58
Umweltschutz, Bedrohte Seepferdchen; Dez. 78
Unfall, Das Notfall-Räderwerk; Jan. 64
Unicore, Grid Computing in Deutschland; Juli 72
unirdische Landschaften, Die ~n ~ des Mars; Juli 42
Universum, Ein ~ voll dunkler Rätsel; Dez. 28
unsichtbare Wald, Der ~ ~ im Meer; Juni 56
Unterschrift, Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Unterwegs zum Nanolaufwerk; Mai 90
Unterwelt, Tod in Mesopotamien; Sept. 68
Ununterscheidbarkeit, Die Identität der Quanten; Jan. 56
Ursachen der Vereisung, Klarheit über das Klima; April 20
Ursprung, Der ~ lag in Afrika; März 38
UV-Strahlung, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
Vakuumenergie, Das expandierende Universum; Juni 46
Verbraucherschutz, Vom Datensatz zur Unperson; Juli 80

MARS-SPEZIAL

Ab 18.12.2003 erhältlich

Alles klar für die Landung auf Mars!

In wenigen Tagen bekommt der Rote Planet Besuch aus Europa, den USA und Japan. Ab Weihnachten werden vier Raumsonden auf dem Mars landen und geländegängige Fahrzeuge sowie anderes wissenschaftliches Gerät auf seiner Oberfläche absetzen. Ziel der internationalen Raumflotte ist es, nach Wasser und Leben auf dem Roten Planeten zu fahnden.
MARS-SPEZIAL informiert in packenden Berichten über alle Missionen und bringt Sie auf den aktuellen Stand der Marsforschung.

Alles Wissenswerte erfahren Sie ab dem 18.12.03 im Sonderheft von ASTRONOMIE HEUTE für nur 2,50.

Dieses Heft ist nur bei Ihrem Zeitschriftenhändler erhältlich (kein Direktversand möglich)!

www.astronomie-heute.de

Verhaltensmanipulation, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Verifikation, Der vermessene Mensch; Juli 76
Verifikation, »Captain an Computerlogbuch«; Aug. 69
vermessene Mensch, Der ~ ~; Juli 76
Verschränkung, Spielregeln für Quantencomputer; April 19
Verstärker, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
Verstümmelt durch Gülle; April 58
verteiltes Rechnen, Rechenleistung aus der Steckdose; Juli 66
verteiltes Rechnen, Grid Computing in Deutschland; Juli 72
Verweiblichung, Geziefer im Gehirn; Mai 98
Videokamera, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66
Vieltweltentheorie, Paralleluniversen; Aug. 34
Vierfarbensatz, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Vierteljahrhundert, Ein ~ Mathematik; Mai 24
Vierteljahrhundert, Ein ~ Informatik; Sept. 20
virtual amp, Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
virtuelles Kraftwerk, Das Kraftwerk im Keller; April 85
Virtuelles Röhren-Glühen; März 82
visuelle Illusion, Richtiges Sehen – eine optische Täuschung?; Mai 74
Vitamin D, Die Evolution der Hautfarben; Juni 38
Vogelevolution, Zuerst kam die Feder; Okt. 32
Vogelgrippe-Virus, Die siegreiche Strategie des Grippevirus; Aug. 48
Vom Datensatz zur Unperson; Juli 80
Von den Pocken besiegt; Okt. 72
Von der Bohne zum Espresso; Mai 82
Wafer, Sandstrahler in der Nanowelt; Okt. 81
Wafer-Belichter, Spiegel aus Nanoschichten; Okt. 83
Waffentechnik, Der Mythos vom sauberen Krieg; April 68
Wahrnehmung, Rätsel Kleinhirn; Nov. 60
Warum gibt es Großmütter?; Jan. 48
Was steuert uns, wenn wir am Steuer sitzen?; Jan. 70
Wasservorkommen, Erkundung des Roten Planeten; Dez. 70
Wasserstoff, »In hundert Jahren benötigt Europa 200 Fusionskraftwerke«; April 90
Wasserversorgung Ostasiens, Gletscherschwund im Himalaya; Aug. 59
Watson, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Wavelets, Ein Vierteljahrhundert Mathematik; Mai 24
Wilkins, »Jeder Versuch, andere am Verbessern von Dingen zu hindern, richtet sich gegen den Geist des Menschen«; April 74
Wind Corrected Munition Dispenser, Satellitengelenkte Waffen; April 66
Weckmolekül, Die Alltagsdroge Koffein; Juni 64
Wein, Der ~ der Römer; Dez. 86
Weiße Zwerge, Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Wellenkraftwerk, Ausbruch aus der Nische; April 80
Weltalter, Das expandierende Universum; Juni 46
Wenn Sterne zusammenprallen; Jan. 28
Wer unterschreibt, der lebt; Aug. 71
Wer waren die ersten Hominiden?; Sept. 46
Westantarktis, Auf dünnem Eis; Feb. 30
Widerspenstigen Zähmung, Der ~ ~; Juli 24
Windkraft, Ausbruch aus der Nische; April 80
Wirkungsgrad, Immer noch ein Quäntchen besser; April 89
Wissenschaftsgeschichte, Albertus Magnus – der große Neugierige; Nov. 70
Wuppertal-Institut, »Die vergessene Säule der Energiepolitik«; April 84
Zeig mir, wie du tippst, und ich sag dir, wer du bist; Aug. 71
Zeitalter der Menschenaffen, Das ~ ~ ~; Dez. 58
Zellforschung, Die Revolution in der Gehirnforschung; März 23
Zellskelett, 3-D-Einblicke in die Zellmaschinerie; Nov. 44
Zentralnervensystem, Die Revolution in der Gehirnforschung; März 23
Zensur in der Zelle; Okt. 52
Zentrum der Milchstraße, Das ~ ~ ~; April 26
Zivilisationskrankheiten, Menschwerdung durch Kraftnahrung; Mai 30
Zucker-Imitate, Süße Medizin; Feb. 46
Zuckerstoffwechsel, Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille; Juli 58
Zuerst kam die Feder; Okt. 32
Zufallszahlen, Ein Vierteljahrhundert Informatik; Sept. 20
Zugangskontrolle, Können diese Augen lügen?; Juli 81
Zugangskontrolle, Ansichten eines Angesichts; Aug. 66

Autoren der Hauptbeiträge

Adis, Joachim; Feb. 64
Albee, Arden L.; Juli 42
Aschenbrenner, Norbert; April 85
Ascher, Marcia; Juni 74
Baake, Ellen; Juli 81
Baltus, René; Aug. 71
Banchereau, Jacques; April 38
Bartel, David P.; Okt. 52
Bartmann, Dieter; Aug. 71
Baumeister, Wolfgang; Nov. 44
Begun, David; Dez. 58
Beise, Jan; Jan. 48
Bekenstein, Jacob D.; Nov. 34
Bentley, Charles R.; Feb. 30
Berlejung, Angelika; Sept. 68
Bindschadler, Robert A.; Feb. 30
Binnig, Gerd; Mai 90
Blaustein, Andrew R.; April 58
Bobrowski, Michael; Juli 80
Börner, Gerhard; Dez. 28
Bower, James M.; Nov. 60
Bräuer, Günter; März 38
Bretschneider, Joachim; Sept. 68
Brun, Jean-Pierre; Dez. 86
Brush, Alan H.; Okt. 32
Busch, Christoph; Juli 81
Castin, Yvan; Juni 28
Cattaneo, Marco; Dez. 70
Changeux, Jean-Pierre; März 23
Chapin, John K.; Jan. 74
Chaplin, George; Juni 38
Cline, David B.; Okt. 44
Daum, Henning; Juli 81
Delahaye, Jean-Paul; Sept. 20
Dickson, James H.; Juli 30
Diedrich, Klaus; Dez. 42
Doldinger, Klaus; März 85
Duncan, Robert C.; Mai 56
Duplessy, Jean-Claude; April 20
Duschl, Wolfgang J.; April 26
Eberhard-Metzger, Claudia; Jan. 71
Eberl, Ulrich; Aug. 66
Eichinger, Hannes; Jan. 64
Ekkernkampf, Axel; Jan. 70
Enders, Margit; Feb. 56
Falkowski, Paul G.; Juni 56
Feld, Michael S.; Mai 66
Fette, Harald; März 87
Foster, Ian; Juli 66
Freedman, Wendy L.; Juni 46
Freiwald, André; Feb. 56
Fritsche, Olaf; Nov. 44
Gehrels, Neil; März 48
Groß, Michael; April 78
Guyon, Étienne; Okt. 26
Hagemayer, Pablo; Jan. 64; Jan. 68
Handley, Linda L.; Juli 30
Hennerich, Michael G.; Jan. 71
Hennicke, Peter; April 84
Hescheler, Jürgen; Mai 66
Heyden, Doris; Okt. 70
Hurley, Jarrod R.; Feb. 38
Illy, Ernesto; Mai 82
Ingram, Donald K.; Juli 58
Jablonski, Nina G.; Juni 38
Jauk, Gunther; Aug. 59
Johnson, Pieter T. J.; April 58
Kane, Gordon; Sept. 26
Kasten, Erich; Sept. 58
Kelly, Henry C.; März 28
Klatsky, Arthur L.; Okt. 62
Kopf, Achim; Jan. 38
Kourilsky, Philippe; Nov. 28
Kouveliotou, Chryssa; Mai 56
Krausse, Dirk; Feb. 72
Kuhnt, Wolfgang; Dez. 48
Kurth, Reinhard; Aug. 52
Lackner, Karl; April 90
Landau, Holger; März 81
Lane, Mark A.; Juli 58
Lau, Nelson C.; Okt. 52
Lenzen-Schulte, Martina; Dez. 36
Leonard, Peter J. T.; März 48
Leonard, William R.; Mai 30
Levi, Michael A.; März 28
Levine, Robert V.; Aug. 26
Liboff, Richard L.; März 70
Liger-Belair, Gérard; Juli 52
Linsmeier, Klaus-Dieter; März 78; Okt. 72
Lotto, R. Beau; Mai 74
Maeder, Thomas; Feb. 46
Maichel, Gert; April 86
Marais, Eugène; Feb. 64
Moombolah-Goagoses, Esther; Feb. 64
Müller, Bernd; März 86; April 89; Okt. 83
Neuneck, Götz; April 68
Nicolelis, Miguel A. L.; Jan. 74
Nielsen, Michael A.; April 19
Nundi, Surajit; Mai 74
Oeggl, Klaus; Juli 30
Ourisson, Guy; Juli 24
Parsons, Lawrence M.; Nov. 60
Pesie, Peter; Jan. 56
Picq, Pascal; Jan. 22
Piro, Luigi; März 48
Popp, Roland; Nov. 70
Porter, Mason A.; März 70
Prum, Richard O.; Okt. 32
Purves, Dale; Mai 74
Puttré, Michael; April 66
Ramond, Pierre; Feb. 24
Raptis, Georgios; Juli 81
Rauschenbach, Bernd; Okt. 81
Reichert, Uwe; Dez. 70
Reinefeld, Alexander; Juli 72
Rößiger, Monika; Dez. 78
Roth, George S.; Juli 58
Ryle, Marcus; März 82
Sabel, Bernhard A.; Sept. 58
Sailer, Michael; April 88
Sapolsky, Robert M.; Mai 98
Schaper, Annette; März 32
Schindler, Axel; Okt. 81
Schintke, Florian; Juli 72
Schnabel, Uwe; Juli 76
Schobert, Deniz; Aug. 69
Schröder, Tim; März 88
Seifert, Julia; Jan. 70
Shara, Michael; Jan. 28
Shara, Michael M.; Feb. 38
Sicard, Bruno; Juni 64
Simon, Horst; Juli 74
Sinninghe Damasté, Jaap S.; Dez. 48
Stampfer, Meir J.; März 58
Steib, Birgit; Nov. 70
Stein, Ross S.; Nov. 52
Stewart, Ian; Mai 24
Strohmaier, Gotthard; Jan. 84
Tacke, Jörg; Aug. 69
Tambourin, Pierre; Aug. 20
Tegmark, Max; Aug. 34
Thompson, Christopher; Mai 56
Vettiger, Peter; Mai 90
Voland, Eckart; Jan. 48
Voldman, Steven H.; Juni 82
Wagner, Thomas; Dez. 48
Walker, Elizabeth Jane; Aug. 48
Watson, James D.; April 74
Weaver, Kimberly; Sept. 35
Webster, Robert G.; Aug. 48
Wengenmayr, Roland; April 84; Okt. 78
Willett, Walter C.; März 58
Wong, Kate; Sept. 46
Zompro, Oliver; Feb. 64

THEMENHEFTE umfassend verständlich faszinierend

SPEZIAL »OMEGA«

Das SPEZIAL »Omega« ist ein Lese- und Knobelspaß für alle Mathematikfans: Vom »Spazierweg über die Brücken von Königsberg« bis hin zu modernen Routenplanungsprogrammen wird in dem Heft ein Überblick über die Vielfalt der Graphentheorie gegeben, während ein Zerlegeexperiment mit einem Würfel und Preda Mihailescus Weg zum Nachweis der Catalan'schen Vermutung den Leser in die Welt der praktischen und theoretischen Mathematik einführen. Abgerundet werden die wissenschaftlichen Beiträge mit Berichten über eine Modellierungswoche mit mathematischen Körpern und über ein Mathematik-Museum, die zeigen, dass das Fach weder trocken noch langweilig ist. Mathematikfreunde, die Lust auf mehr Literatur bekommen haben, erhalten schließlich durch die Buchrezensionen zum Thema weitere Anregungen.

Das SPEZIAL »OMEGA« kostet € 8,90 und ist ab 05.12.03 im Handel erhältlich.

BIOGRAFIE

»Die Curies«
- Eine zielstrebige junge Dame
- Ein perfektes Paar
- Die Entdeckung der künstlichen Radioaktivität

€ 8,90

G&G-DOSSIER

»Angriff auf das Menschenbild«
Ab 12.12.03 im Handel
- Ist unsere geistige Leistung manipulierbar?
- Lügen als Motor der Menschwerdung?
- Nahtod-Erfahrugen als Blicke ins Jenseits?

€ 8,90

SPEZIAL

»Intelligenz«
Ab 28.11.03 im Handel
- Wie intelligent sind Intelligenztests?
- Hochbegabte, Wunderkinder und »Savants«
- Computer, Spiele und die Realität

Unveränderter Nachdruck; € 8,90

SUW-BASICS

»Mein Teleskop«
- Linsen- oder Spiegelfernrohre?
- Optiken und Montierungen
- Empfehlenswerte Teleskope für Einsteiger

€ 8,90

SUW-SPECIAL

»Der heiße Kosmos«
Ab 09.12.03 im Handel
- Eruptionen der Sonne
- Das Rätsel der fehlenden Atome
- Supernovae und Pulsare
- Aktive Sterne

€ 8,90

AHNERT 2004

Das Standardwerk für Hobbyastronomen mit monatlichen Übersichten und Tabellen über das Himmelsgeschehen, zahlreichen Tipps zur eigenen Beobachtung u. v. m.; € 9,80,- zzgl. Porto; als Standing Order € 8,50 inkl. Porto Inland; ISBN 3-9636278-41-5

DOSSIER »DIE UNRUHIGE ERDE (II)«

Ihre Gestalt verdankt die Erde komplizierten Kräften aus der Tiefe, die sich immer wieder auch in Erdbeben und Vulkanausbrüchen bemerkbar machen. Da uns der direkte Blick in diese Tiefe verwehrt ist, nutzen Geowissenschaftler technische Hilfsmittel, um Plattentektonik und Gesteinsströme im Erdmantel zu erforschen. Traditionell liefern seismische Momentaufnahmen ein Bild von den unterirdischen Strukturen. Mittlerweile können Computersimulationen die Erddynamik nachbilden, und Satelliten-Messungen – darunter auch die jüngste Mission namens GRACE – ermitteln Schwankungen im irdischen Schwerefeld, die auf das dramatische Geschehen im Erdinneren schließen lassen.

Das DOSSIER «Die unruhige Erde II« kostet € 8,90.

Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer.

Eine Bestellmöglichkeit finden Sie auf dem Beihefter oder mit weiteren Informationen im Internet unter

WWW.SPEKTRUM.DE

RON MILLER

Kugelsternhaufen – unerwartet jung

Die kugeligen Zusammenballungen aus Hunderttausenden oder gar Millionen von Sternen galten bisher als ehrwürdige Greise des Universums. Doch viele dieser Kugelsternhaufen sind überraschend jung, wie neuere Forschungen zeigen.

WEITERE THEMEN IM JANUAR

Mikroströmungen

Wenn Kanäle und Ventile nur noch mikrometergroß sind, spielen Gase und Flüssigkeiten verrückt. Da kann dann auch schon mal Gas von kalt nach warm strömen.

Rätselhafter Schlummer

Was ist Schlaf und wozu brauchen wir ihn? Neurowissenschaftler sind dabei, dieses alte Rätsel zu lösen.

MINDY JONES

ANDREAS FULS

Ging die Mayakultur 208 Jahre später unter?

Der Dresdener Codex ist die wichtigste Quelle zur Astronomie der Mayas. Eine neue Analyse der in dieser Handschrift enthaltenen Daten zeigt: Die klassische Mayakultur ging nicht im 9., sondern erst im 11. Jahrhundert nach Christus unter.

SEBASTIÃO SALGADO

Ökonomie der Kinderarbeit

Um die Ausbeutung von Kindern zu beenden, muss sich der lange Arm des Gesetzes mit der unsichtbaren Hand des Marktes verbünden.